

# ÖLJYVUOTOJEN TODENNÄKÖISYYKSISTÄ MERIONNETTOMUUKSISSA SUOMEN RANNIKOLLA

Tuomo Karppinen  
Timo Aitta



Merenkulkuhallitus  
Helsinki 1980

# ÖLJYVUOTOJEN TODENNÄKÖISYYKSISTÄ MERIONNETTOMUUKSISSA SUOMEN RANNIKOLLA

Tuomo Karppinen  
Timo Aitta



Merenkukkuhallituksen toimeksiannosta tehty tutkimus

Helsinki 1980

# SISÄLLYSLUETTELO

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| YHTEENVETO                           | 3  |
| JOHDANTO                             | 4  |
| MENETELMÄ                            | 6  |
| TILASTOT                             | 10 |
| <u>Lähteet</u>                       | 10 |
| <u>Öljyvuodot</u>                    | 14 |
| <u>Öljykuljetukset</u>               | 15 |
| <u>Liikennetiheys</u>                | 17 |
| <u>Merionnettomuudet</u>             | 18 |
| <u>Poisson-prosessi</u>              | 22 |
| <u>Öljyvuodot Ruotsin rannikolla</u> | 26 |
| TULOKSET                             | 28 |
| <u>Onnettomuuksien lukumäärä</u>     | 28 |
| <u>Öljymäärä</u>                     | 32 |
| JOHTOPÄÄTÖKSET                       | 38 |
| LÄHDEVIITTAUKSET                     | 41 |
| LIITE                                | 42 |



## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty merenkulkuhallituksen toimeksiannosta ja rahoituksella pääjohtaja J-E. Janssonin aloitteesta. Työn edistyessä pääjohtaja Jansson on monin tavoin auttanut meitä, josta olemme hyvin kiitollisia. Samoin haluamme lämpimästi kiittää merenkulkuhallituksen henkilökuntaa työn kannalta tärkeistä keskusteluista ja avusta tilastotietojen etsimisessä.

Työhön liittyvät tietokoneajot on suoritettu Merentutkimuslaitoksen tietokonekeskuksessa, jonka henkilökunta kärsivällisesti jaksoi opastaa meitä koneen käytössä. Olemme tästä heille hyvin kiitollisia. Erityisen kiitollisina muistamme Seppo Pietikäisen.

Fil.lis. M. Nurmiselle ja O. Staffansille Ph.D., olemme ainakin lämpimän kiitoksen velkaa analyysimenetelmän tilastollista ja matemaattista puolta koskeneista keskusteluista. R. Stewartille, Ph.D., lausumme parhaat kiitokset häneltä postitse saamistamme artikkeleista ja hänen työtämme kohtaan osoittamastaan kiinnostuksesta.

Helsingissä, 5. helmikuuta 1980

Tuomo Karppinen ja Timo Aitta



## YHTEENVETO

Työssä on tarkasteltu todennäköisyyslaskennan avulla Suomen rannikolla merionnettomuuksissa tapahtuvia öljyvuotoja. Lähtökohtana ovat olleet merenkulkuhallituksen arkistosta kerätyt tiedot vuodoista 1971 - 1978. Tutkimuksen perusteella on varauduttava siihen, että öljyvuotoja sattuu merionnettomuuksissa Suomen rannikolla kahdesta kolmeen vuodessa edellyttäen, että meriliikenne Suomen rannikolla ei muutu kovin paljoa nykyisestä. Kuitenkin viisikin öljyvuotoa vuodessa on mahdollista. Vuodon tapahduttua on mereen valuva öljymäärä todennäköisesti pienempi kuin noin sata tonnia. Vastaava määrä öljyä voi ajautua Suomen rannikolle myös muualla Itämeren piirissä sattuneen öljyvuodon seurauksena. Nämä tapaukset ovat kuitenkin ilmeisesti harvinaisempia kuin Suomen rannikolla tapahtuvat öljyvuodot.

## JOHDANTO

Meritse kuljetetaan vuosittain lähes kaksi miljardia tonnia raakaöljyä ja öljytuotteita. On arvioitu, että tästä öljymäärästä joutuu kuljetuksen yhteydessä tavalla tai toisella mereen puolesta yhteen promilleen. Sellaiset säiliölaivoille sattuneet merionnettomuudet kuin Torrey Canyonin haaksirikko vuonna 1967 Englannin kanaalissa, jolloin mereen pääsi öljyä satatuhatta tonnia, ja Amoco Cadizin ajautuminen karikolle 1978 Bretagnen rannikolla, minkä seurauksena mereen valui yli kaksisataatuhatta tonnia öljyä, ovat saaneet yleisen huomion kohdistumaan öljyn merikuljetusten turvallisuuteen. Kuitenkin tahattomasti, onnettomuuksien yhteydessä aluksista mereen joutuva öljymäärä on vain viidenneksen kaikista alusten aiheuttamista öljypäästöistä. Yli kaksi kolmasosaa öljypäästöistä on toiminnallisia, joista valtaosa syntyy säiliölaivojen lastitankkeja pestäessä. (kts esim. Karppinen, 1977 tai SOU, 1979)<sup>1</sup>

Toiminnallisiin öljypäästöihin on periaatteessa suhteellisen helppo vaikuttaa. Tehokkaita keinoja niiden vähentämiseksi ovat erillisten lasti- ja painolastitankkien käyttö ja niin sanottu Load-on-Top-lastausjärjestelmä. Onnettomuuksissa mereen valuvan öljymäärän pienentämiseksi on ehdotettu säiliölaivoihin rakennemuutoksia, kuten kaksoispohjaa, mutta rakennemuutosten tehokkuudesta öljyvuotojen estäjänä ei olla yksimielisiä.

Tehokkaiden toimenpiteiden suunnittelua alusten aiheuttamien öljypäästöjen vähentämiseksi on vaikeuttanut ko. onnettomuuksia koskevien tilastotietojen vähyys. Näitä tilastoja tarvittaisiin myös arvioitaessa öljyntorjuntaan varattavia resursseja. Maailman laajuisista viime vuosina julkistetuista tilastoista ja niiden selvityksistä on mainittava IMCO:n (1978) säiliölaivoille vuosina 1968 - 1977 sattuneita pahoja onnettomuuksia koskeva analyysi. Suomen kannalta on kuitenkin ehkä mielenkiintoisempi Ruotsissa 1979 valmistunut, merikuljetusten aiheuttamaa ympäristöuhkaa käsittelevä komiteamietintö SOU (1979).

---

<sup>1</sup>Kirjallisuusviitteet on lueteltu aakkosjärjestyksessä kirjoituksen lopussa.

Siinä on mm. arvioitu Ruotsin rannikolla 1970-luvulla merionnettomuuksissa veteen joutunut öljymäärä. Suomessa merionnettomuuksia ja niiden syitä on tutkinut prof. Kostilainen. Hän julkaisi jo 1971 Itämeren piirissä vuosina 1960 - 1969 säiliölaivoille sattuneita merionnettomuuksia koskevan tilastollisen tutkimuksen. Kostilaisen ja Hyvärisen raporteissa vuosilta 1973 ja 1976 käsitellään myös kuivalastilaivoille sattuneita onnettomuuksia. Itämereen säiliölaivojen onnettomuuksissa joutuvasta öljymäärästä Kostilainen (1971) esittää arvion japanilaisten lähteiden perusteella.

Ehkä täydellisimmän ja luotettavimman tiedoston öljypäästöistä on kerännyt Yhdysvaltojen rannikkovartiosto U.S.A:n rannikkovesiltä. Tämän tilaston pohjalta on Yhdysvalloissa laadittu joitakin tilastollisia tutkimuksia säiliölaivojen öljyonnettomuuksista ja kehitetty todennäköisyysteoreettisia menetelmiä öljyonnettomuuksien lukumäärän ja vuodon koon ennustamiseksi. Amerikkalaisista tutkimuksista mainittakoon Devanney&Stewart (1974) ja Stewart&Kennedy (1978). Viimeksi mainitun raportin sisältämää aineistoa on myös julkaistu artikkeleissa Stewart (1977) ja Stewart&Devanney (1978). Donovan&Owen (1977) ovat soveltaneet Devanneyn ja Stewartin (1974) menetelmää laskiesaan odotettavissa olevan, mereen joutuvan öljyn määrän kuljetettaessa öljyä Alaskan rannikolta etelään. Vermeerin (1978) esittämä menetelmä säiliölaivaonnettomuudessa todennäköisesti mereen valuvan öljymäärän laskemiseksi poikkeaa edellä mainituissa amerikkalaisissa analyyseissa käytetyistä menetelmistä siinä, että Vermeer ottaa huomioon onnettomuuteen (yhteen-törmäykseen) joutuvan säiliölaivan rakenteen, kun taas amerikkalaisissa menetelmissä eri suuruisten öljyvuotojen todennäköisyys lasketaan yksinomaan aikaisemmin sattuneiden öljyvuotojen perusteella.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut laatia arvio Suomen rannikolla merionnettomuuksissa vuosittain veteen valuvasta öljymäärästä. Lähtökohtana on käytetty merenkulkuhallituksen keräämiä tietoja rannikollamme 1971 - 1978 sattuneista merionnettomuuksista, joista on poimittu öljyvuototapaukset. Näiden tilastotietojen perusteella on Devanneyn ja Stewartin (1974) menetelmällä laskettu todennäköisyyksiä, millä eri



pituusina ajanjaksoina Suomen rannikolla sattuu nolla, yksi, kaksi jne. öljyvuotoa edellyttäen, että öljyvuotoja synnyttävä prosessi säilyy samana kuin vuosina 1971 - 1978. Aikaisemmin Suomen rannikolla sattuneiden öljyvuotojen suuruuksien perusteella on laskettu Devanneyn ja Stewartin (1974) kehittämällä menetelmällä todennäköisyyksiä, millä öljyvuodon koko on tiettyä tonnimäärää pienempi.

Koska öljyä voi ajautua Suomen rannikolle myös muualla Itämeren piirissä sattuneen merionnettomuuden seurauksena, on karkeasti arvioitu edellä mainittuja menetelmiä käyttäen Ruotsin rannikolla Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolella sattuvien, suurempia öljyvuotoja aiheuttavien merionnettomuuksien lukumäärä ja mereen valuva öljymäärä. Vertailun vuoksi on tarkasteltu hieman myös yleisesti Suomen rannikolla vuosina 1971 - 1978 sekä kuivalastilaivoille että säiliölaitteille sattuneita merionnettumuksia riippumatta siitä onko öljyä joutunut mereen vai ei.

On ehkä syytä vielä korostaa, että tämä tutkimus koskee vain karilleajoissa, yhteentörmäyksissä tai muissa merionnettomuuksissa syntyviä öljyvuotoja. Tutkimuksen ulkopuolelle jäävät esimerkiksi kaikki toiminnalliset öljypäästöt ja kaikki tahattomat satamissa venttiilivian, pumppuvian, ylitäytön tai muun sellaisen seurauksena sattuvat öljypäästöt. Viimeksi mainittujen lukumääristä ja suuruuksista on kuitenkin kerätty suuntaa antavia tietoja.

#### MENETELMÄ

Öljyvuotojen tilastollista käsittelyä ja käyttökelpoisten ennusteiden laatimista mereen joutuvasta öljystä vaikeuttaa yhdessä onnettomuudessa mereen pääsevän öljymäärän suuri vaihtelu. Esimerkiksi sellainen suure kuin aikaisemmin sattuneiden öljyvuotojen koon keskiarvo ei kerro paljoakaan odotettavissa olevista öljyvuodoista, sillä estimaatin luotettavuusrajat muodostuvat hyvin laajoiksi. Toisaalta kui-

tenkin öljyvuotojen kokonaismäärät ja eri suuruisten vuotojen lukumäärät näyttävät noudattavan selvää kaavaa. Suurin osa öljyonnettomuuksista on kooltaan pieniä, kun taas suurin osa öljystä valuu mereen muutamassa pahassa onnettomuudessa.

Devanney ja Stewart (1974) tarkastelevatkin öljyvuotojen lukumäärää tietyssä aikavälillä ja öljyvuodon kokoa toisistaan riippumattomina satunnaismuuttujina. Öljyvuotojen lukumäärä oletetaan Poisson-prosessiksi, mikä on tavallinen menetelmä tapahtumasarjojen analysoinnissa, ja öljyvuodon koko gamma-prosessiksi. Kumpikin oletta-  
mus edellyttää, että öljyvuodot ovat toisistaan riippumattomia. Toisin sanoen, jo tapahtunut öljyvuoto ei vaikuta seuraavan vuodon mahdollisuuteen tapahtua. Poisson- ja gamma-jakautumien parametrit määritetään aikaisemmin sattuneiden öljyvuotojen perusteella. Kummankin prosessin oletetaan säilyneen vakiona koko ajanjakson, jolta tilastotietoja käytetään, ja säilyvän vakiona edelleen ajan, jolle ennusteita laaditaan.

Jos  $t$  on suure, altistusmuuttuja (exposure variable), johon verrannolliseksi öljyvuotojen lukumäärä voidaan olettaa, kuten satamassa käyneiden alusten lukumäärä, kuljetettu öljymäärä tonnikilometreissä tai satamaan tuotu öljy tonneina, ja aikaisemmin on havaittu  $N$  öljyvuotoa aikavälillä, jonka kuluessa altistusmuuttuja on saanut arvon  $t = T$ , on öljyvuotoja hallitsevan Poisson-prosessin intensiteetti  $1 = N/T$ . Intensiteetti voi siis olla esimerkiksi öljyvuotojen lukumäärä tuhatta satamakäyntiä kohti. Silloin on todennäköisyys, millä tapahtuu  $n$  öljyvuotoa, kun  $t$  laivaa käy satamassa:

$$p(n;1) = e^{-1t}(1t)^n/n!. \quad (1)$$

Koska kuitenkin ei voida olla varmoja intensiteetin  $1$  arvosta, olettavat Devanney ja Stewart sen satunnaismuuttujaksi, joka noudattaa gamma-jakautumaa<sup>1</sup>. Yhdistämällä Poisson-jakautuma (1) ja gamma-jakautuma saadaan todennäköisyydeksi, millä öljyvuotoja sattuu  $n$  kappaletta:

---

<sup>1</sup>Kaksiparametrinen tiheysfunktio, jota D. ja S. käyttävät, on Pearsonin tyyppiä III oleva funktio.

$$p(n; t, N, T) = \frac{(n+N-1)! (t/T)^n}{n! (N-1)! (t/T + 1)^{n+N}} \quad (2)$$

Tässä kaavassa on käytetty edellisessä kappaleessa määritettyjä merkintöjä.

Tiheysfunktio (2) on negatiivinen binomijakautuma. Sen perusteella on todennäköisyys, millä kahden peräkkäisen öljyvuodon välillä (esimerkiksi) satamassa ehtii käydä vähemmän kuin  $T_V$  laivaa:

$$P(t_V < T_V) = 1 - 1/(T_V/T + 1)^N, \quad (3)$$

jossa jälleen  $N$  on aikaisemmin havaittu öljyvuotojen lukumäärä  $T:n$  laivan vierailtua satamassa. Mainittakoon, että suoraan Poisson-jakautumasta johdetun onnettomuuksien välin summafunktion  $P(t_V < T_V) = 1 - \exp(-NT_V/T)$  ja kaavan (3) antaman tuloksen välinen ero on suuruusluokkaa  $O((T_V/T)^2)$ , kun  $T_V/T$  on pienempi kuin yksi. Kaikissa tässä työssä tarkastelluissa tapauksissa edellinen laskukaava ja kaava (3) antavat käytännöllisesti katsoen saman tuloksen.

Öljyvuodon koon oletetaan ko. menetelmässä noudattavan gamma-jakautumaa. Se on varsin yleinen yksihiippuinen jakautuma, jonka muuttuja voi saada vain positiivisia arvoja nolasta äärettömyyteen. Gamma-tiheyden valinta sisältää siten oletuksen, että öljyvuodon koon jakautumaa voidaan aproksimoida yksihiippuisella jakautumalla. Periaatteessa on tietenkin mahdollista, että vuotomäärän jakautumalla on useampia huippuja. Koska gamma-jakautuman muuttuja voi saada arvoja äärettömyyteen asti, merkitsee tämä teoreettisesti sitä, että jopa äärettömän suuri öljyvuoto olisi mahdollinen. Käytännössä suurimman säiliölaivan lastitilavuus rajoittaa suurimman mahdollisen öljyvuodon koon äärelliseksi. Tämä teoreettisen mallin epätarkkuus ei kuitenkaan ole kovin vaarallista, sillä äärettömän suuren öljyvuodon todennäköisyydeksi saadaan joka tapauksessa hyvin, hyvin pieni luku.

Aivan kuten öljyvuotojen lukumäärää kuvaavan Poisson-jakautuman intensiteetti oletettiin satunnaismuuttujaksi,



oletetaan öljyvuodon kokoa kuvaavan gamma-jakautuman kumpikin parametri satunnaismuuttujiksi. Niiden Devanney ja Stewart olettavat noudattavan jakautumaa, jota he nimittävät gamma-hyperpoisson-jakautumaksi. Lopullinen öljyvuodon koon tiheysfunktio saadaan yhdistämällä gamma- ja gamma-hyperpoisson-jakautumat. Kun aikaisemmin on havaittu  $N$  öljyvuotoa kooltaan  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , saadaan yhdistetystä jakautumasta todennäköisyydeksi, millä öljyvuodon koko on pienempi kuin  $x_0$ :

$$P(x < x_0) = \frac{1}{Sp} \int_0^{x_0} \frac{dx}{x} \int_0^{\infty} dr \frac{\Gamma[(N+1)r]}{\Gamma(r)^{N+1}} \left[ \frac{a'(x)}{N+1} \right]^{(N+1)r}, \quad (4)$$

jossa

$$S = \frac{1}{p} \int_0^{\infty} dr \frac{\Gamma(Nr)}{\Gamma(r)^N} (a/N)^{Nr} = \text{normalisointivakio},$$

$a = p^{1/N}/(s/N) =$  aikaisemmin eri onnettomuuksissa mereen valuneiden öljymäärien geometrisen ja aritmeettisen keskiarvon suhde,

$p = \prod x_i =$  öljymäärien kertoma,

$s = \sum x_i =$  mereen valuneen öljyn kokonaismäärä ja

$$a'(x) = \frac{(xp)^{1/(N+1)}}{(x+s)/(N+1)}.$$

Edellisessä kaavassa  $r$  on integroimismuuttuja ja  $\Gamma$  tarkoittaa gamma-funktiota. Summafunktion (4) ja normalisointivakion lausekkeissa olevat integraalit on laskettu numeerisesti. Käytettyä menetelmää on selostettu lyhyesti liitteessä tämän kirjoituksen lopussa.

## TILASTOT

Lähteet

Ennen kuin Devanneyn ja Stewartin menetelmää voidaan soveltaa Suomen rannikolla sattuneiden öljyvuotojen käsittelyyn on

- tunnettava öljyvuotoja aiheuttaneiden merionnettomuuksien lukumäärä ja eri onnettomuuksissa mereen valunut öljymäärä,
- valittava altistusmuuttuja ja hankittava vastaavat tilastotiedot ja
- tarkastettava jollain tavalla soveltuuko kyseinen menetelmä tarkoitukseen.

Koska jo ennakolta oli tiedossa, että Suomen rannikolla on sattunut 1970-luvulla suhteellisen vähän merionnettomuuksia, joissa öljyä on päässyt mereen, päätettiin suoraan kerätä tiedot kaikista Suomen rannikolla rahtilaivoja kohdanneista merionnettomuuksista. Mukaan on otettu kantavuudeltaan 500 tdw suuremmille kuivalastilaivoille ja säiliölaivoille aluevesirajan sisäpuolella sattuneet karilleajot, pohjakosketukset ja alusten keskeiset yhteentörmäykset. Merionnettomuudet, jotka ovat tapahtuneet autolautoille, matkustajalaivoille, jäänmurtaajille ja muille erikoisaluksille, on jätetty tutkimuksen ulkopuolelle. Samoin on jätetty pois sisävesillä sattuneet onnettomuudet. Onnettomuuksiin ei ole laskettu mukaan törmäyksiä laituriin eikä poijuun. Yleisesti kaikki satamissa sattuneet onnettomuudet on jätetty huomioon ottamatta. Siten mukana ei ole esimerkiksi muutamaa 1970-luvulla satamissa sattunutta karilleajoa ja pohjakosketusta. Mukana on sen sijaan esimerkiksi merellä sattunut rahtilaivan törmäys luotsikutteriin, joka on laskettu yhdeksi onnettomuudeksi. Kahden rahtilaivan keskeinen yhteentörmäys taas on onnettomuuksien lukumäärää laskettaessa otettu kahdeksi onnettomuudeksi.

Perustiedot onnettomuuksista, sekä öljyvuototapauksista että muista merionnettomuuksista, on kerätty merenkulkuhallituksen arkistoista. Päälähteinä on käytetty merenkulkuhallituksen vuodesta 1971 pitämää onnettomuuskortistoa ja merenkulkupiirien raportteja "Merenkulkupiirien tietoon tulleet onnettomuudet". Lisäksi on käytetty hyväksi merenkulkuhallituksen julkaisuja "Suomalaista merenkulkua", meriselityspöytäkirjoja ja Navigator-lehden palstaa "Lokikirja". Muutamassa tapauksessa on käännytty onnettomuudessa mukana olleen aluksen varustamon puoleen. Onnettomuuskortiston ja merenkulkupiirien raporttien tietoja on verrattu keskenään. Ne vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Jos onnettomuus on mainittu vain toisessa em. lähteistä, on tiedot tarkastettu muista lähteistä.

Jos merionnettomuuteen on liittynyt merenkulkuhallituksen tietoon tullut öljyvuoto, pitäisi sen periaatteessa ilmetä onnettomuuskortistosta. Kaikki onnettomuuskortistosta tai merenkulkupiirien raporteista löydetyt öljyvuototapaukset on tarkastettu meriselityspöytäkirjoista vuodon koon selvittämiseksi. Lisäksi on samalla tavalla tarkastettu kaikki merenkulkuhallituksen "öljyvahinkomapissa" mainitut onnettomuudet. Jos meriselityksessä on ollut maininta öljyvahingosta, on onnettomuus luetteloitu taulukkoon 1 varmana tapauksena ja taulukossa on merenkulkuhallituksen asiakirjoista löydetty arvio mereen valuneen öljyn määrästä. Tämän arvion perusteella on arvioitu öljyvuodon koko tonneina.

Vaikka onnettomuuskortiston tai öljyvahinkomapin mukaan oli tapahtunut öljyvuoto, ei kuitenkaan aina meriselityksestä löytynyt mainintaa vuodosta. Jos jostain muualta, lähinnä Navigatorista, löydettiin varmistusta sille, että öljyvuoto todella oli tapahtunut, on onnettomuus mainittu taulukon 1 alaosassa todennäköisenä öljyvuoto-onnettomuutena.

## TAULUKKO 1

Suomen rannikolla vuosina 1971-1978 sattuneet merionnettomuudet, joissa öljyä on päässyt mereen.

|                         |                  | Mereen päässyt öljy |                           |        |               |
|-------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|--------|---------------|
| Päivämäärä              | Alus             | Kartalla<br>n:o     | Asiakirjat                | Arvio  | Laatu         |
| <u>Kuivalastilaivat</u> |                  |                     |                           |        |               |
| 14.12.1978              | Norden           | 1                   | 40 m <sup>3</sup>         | 40 tn  | Pö. 1         |
| 7.5.1977                | Blue Shimonoseki | 2                   | 30-40 tn                  | 35 tn  |               |
| 25.2.1976               | Kormoran         | 3                   | 10 000 l                  | 10 tn  | K. pö.        |
| 16.12.1975              | Altair           | 4                   | n. 80 tn                  | 80 tn  | K. pö. ja vö. |
| 11.4.1973               | Finnboston       | 5                   | 5 m <sup>3</sup>          | 5 tn   | K. pö.        |
| 27.1.1973               | Frances          | 6                   | 30 m <sup>3</sup>         | 30 tn  | R. pö.        |
| 14.12.1971              | Tamerlane        | 7                   | "vähän"                   | 3 tn   | Kr. pö.       |
| <u>Säiliölaivat</u>     |                  |                     |                           |        |               |
| 29.11.1972              | Pronto           | 8                   | väh. 60 m <sup>3</sup>    | 60 tn  | K. pö.        |
| 20.4.1971               | Fennia           | 9                   | "muutama m <sup>3</sup> " | 3 tn   |               |
| <u>Muut</u>             |                  |                     |                           |        |               |
| 28.6.1972               | Scania Express   | 10                  | 0,4-0,5 m <sup>3</sup>    | 0,5 tn |               |
| 11.11.1971              | EOL              | 11                  | 7 350 l                   | 7,5 tn | Dö. ja vö.    |

Onnettomuudet, joissa on todennäköisesti päässyt jonkin verran öljyä mereen.

|                         |            |    |  |              |  |
|-------------------------|------------|----|--|--------------|--|
| <u>Kuivalastilaivat</u> |            |    |  |              |  |
| 9.5.1976                | Mette Bewa | 12 |  |              |  |
| 15.11.1973              | Breevecht  | 13 |  | 1, 1,5, 2 tn |  |
| 9.11.1971               | Heiken Bos | 14 |  |              |  |
| <u>Autolautta</u>       |            |    |  |              |  |
| 4.7.1978                | Diana      | 15 |  |              |  |

Lisäksi on öljyä päässyt mereen mahdollisesti vähintään viidessä merionnettomuudessa. Kaikki edellä mainitut onnettomuudet ovat olleet karilleajoja.





Kuva 1. Taulukossa 1 luetellut, merionnettomuuksissa Suomen rannikolla 1971 - 1978 tapahtuneet öljyvuodot ja suuremmat Ruotsin rannikolla 1970 - 1978 tapahtuneet öljyvuodot (taulukko 8).

## Öljyvuodot

Merenkulkuhallituksen arkistosta kerättyjen tietojen perusteella, jotka ilmenevät taulukosta 1, on Suomen rannikolla 1971 - 1978 sattunut kuivalastilaivoille merionnettomuuksien yhteydessä varmasti seitsemän öljyvuotoa ja näiden lisäksi todennäköisesti kolme öljyvuotoa. Samojen lähteiden perusteella on säiliölaivoista valunut merionnettomuuksissa 1971 - 1978 aluevesillämme öljyä mereen vain kaksi kertaa. Näiden onnettomuuksien lisäksi on onnettomuuskortistossa ja öljyvahinkomapissa mainittu joitakin merionnettomuuksia, joissa sattunutta öljyvahinkoa ei mistään muualta ole onnistuttu varmistamaan. Kun vielä nämäkin tapaukset otetaan huomioon, on kuivalastilaivoille ja säiliölaivoille sattunut 1971 - 1978 Suomen rannikolla merionnettomuuksien yhteydessä viidestätoista kahteenkymmeneen öljyvahinkoa. Tämän arvion pitäisi sisältää kaikki suuremmat öljyvuodot. Pieniä, kymmenien tai satojen litrojen suuruisia vuotoja on näiden lisäksi hyvinkin voinut tapahtua. Tuntuu epä-todennäköiseltä, että taulukosta 1 puuttuisi ainuttakaan kymmenien tonnin suuruista vuotoa, sillä sellaisesta merenkulkuhallitus olisi varmaankin saanut tiedon. Sen sijaan taulukossa 1 oleva arvio mereen vuotaneen öljyn määrästä on varsin epävarma. Esimerkiksi mt Siroccosta 21.8.1976 Ruotsin rannikolla Oxelösundissa mereen valunut öljymäärä on merenkulkuhallituksen asiapapereissa arvioitu 155 kuutiometriksi, kun taas ruotsalaisten tietojen mukaan mereen joutui 300 tonnia öljyä (SOU, 1979). Taulukossa 1 olevat arviot öljyvuodon koosta ovat kenties pikemminkin liian pieniä kuin suuria, sillä öljyvahinkoja on nähtävästi mieluummin vähätelty kuin suurenneltu.

Taulukosta 1 puuttuvat kaikki satamissa sattuneet tahalliset tai tahattomat alusten aiheuttamat öljyvahingot. Navigatorin "Lokikirjan" mukaan on Kotkan ja Haminan satamissa tapahtunut 1971 - 1978 31 pienempää öljyvahinkoa ja näiden lisäksi kolme alle puolen tonnin, neljä puolesta tonnista yhteen tonniin ja yksi viiden tonnin suuruinen öljyvuoto. Näihin sisältyy mm. mt Nunnalahden pohjakosketus Kotkan öljysata-



massa 27.1.1971, jolloin mereen joutui tuhat litraa kaasunöljyä. Sköldvikissä on sattunut mm. yksi 50 tonnin öljyvuoto pumppausvarren katkettua.

### Öljykuljetukset

Taulukossa 1 lueteltujen harvojen öljyvahinkojen perusteella on vaikea valita sopivaa altistusmuuttujaa. Säiliölaivoille sopiva olisi kenties maihin tuotu öljymäärä, mutta kahden onnettomuuden perusteella ei vielä voi tehdä tilastollista analyysiä. Joka tapauksessa taulukossa 2 on esitetty tullilaitokselta saatu tilasto kivennäisöljyjen tuonnista Suomeen ja viennistä Suomesta 1970-luvulla. Suomen öljyntuonti on pysynyt koko 1970-luvun suhteellisen tasaisesti noin kolmenatoista miljoonana tonnina vuodessa. Vienti on kasvanut 1970-luvun alkuvuosien 200 000 tonnista yli puoleentoista miljoonaan tonniin. Kivennäisöljyjen rannikkokuljetukset ovat samaan aikaan olleet noin viisi miljoonaa tonnia vuodessa (taulukko 3). Suurin osa tästä öljyvirrasta on lähtenyt Nesteen jalostamoilta Sköldvikistä ja Naantalista. Kun lasketaan yhteen kivennäisöljyjen tuonti, vienti ja kotimaan kuljetukset, saadaan tulokseksi, että Suomen rannikolla liikkuu vuosittain noin kaksikymmentä miljoonaa tonnia öljyä (taulukko 4).

Mielenkiintoinen on taulukon 3 viimeinen sarake, jossa on kotimaankuljetuksissa vuosittain suomalaisista satamista viedyn ja satamiin tuodun öljymäärän erotus. Sen mukaan on kotimaankuljetuksissa satamista viety vuodesta toiseen sadastatuhanneista tonnista kolmeensataantuhanteen tonniin enemmän öljyä kuin mitä niihin on tuotu. Jos kysymyksessä ei ole pelkkä tilastotekninen hävikki, saattaa öljymäärien erotus johtua siitä, että jokaisesta öljylastista pieni osa jää aluksen säiliöihin. Tämän jäteöljyn keräämiseksi säiliöiden pesun yhteydessä on mm. Sköldvikin, Naantalín, Haminan ja Kotkan satamissa jäteöljysäiliöitä. Ilman näitä säiliöitä öljyinen lastitankkien puhdistuksessa käytetty vesi joutuisi mereen.

| Vuosi | TAULUKKO 2 |        | TAULUKKO 3 |        | TAULUKKO 4 |                         |
|-------|------------|--------|------------|--------|------------|-------------------------|
|       | Tuonti     | Vienti | Yhteensä   | Tuonti | Vienti     | Erotus<br>vienti-tuonti |
| 1978  | 13,42      | 1,71   | 15,13      |        |            |                         |
| 1977  | 14,70      | 1,47   | 16,17      | 5,40   | 5,53       | 0,13                    |
| 1976  | 14,09      | 0,91   | 15,00      | 5,08   | 5,17       | 0,09                    |
| 1975  | 12,75      | 0,16   | 12,91      | 4,47   | 4,65       | 0,18                    |
| 1974  | 13,92      | 0,26   | 14,18      | 4,63   | 4,88       | 0,25                    |
| 1973  | 13,86      | 0,17   | 14,03      | 4,88   | 5,18       | 0,30                    |
| 1972  | 13,14      | 0,15   | 13,29      | 5,04   | 5,19       | 0,15                    |
| 1971  | 12,07      | 0,18   | 12,25      | 4,96   | 5,12       | 0,16                    |
| 1970  | 12,95      | 0,41   | 13,36      | 4,78   | 5,00       | 0,22                    |
|       |            |        |            |        |            | 21,70                   |
|       |            |        |            |        |            | 20,17                   |
|       |            |        |            |        |            | 17,56                   |
|       |            |        |            |        |            | 19,06                   |
|       |            |        |            |        |            | 19,21                   |
|       |            |        |            |        |            | 18,48                   |
|       |            |        |            |        |            | 17,37                   |
|       |            |        |            |        |            | 18,36                   |

TAULUKKO 2 Kivennäisöljyjen (raaka, esitislattu ja tuotteet) tuonti Suomeen ja vienti Suomesta vuosina 1970-1978 tullilaitoksen mukaan miljoonina tonneina.

TAULUKKO 3 Kivennäisöljyjen kuljetukset suomalaisten merisatamien välillä vuosina 1970-1978 merenkulkuhallituksen ja Suomen Satamaliiton mukaan miljoonina tonneina.

TAULUKKO 4 Kivennäisöljyjen tuonti, vienti ja rannikkokuljetukset (vienti) yhteensä vuosina 1970-1978 miljoonina tonneina.

### Liikennetiheys

Sekä säiliölaivoille että kuivalastilaivoille sopiva altistusmuuttuja olisi mahdollisesti satamakäyntien lukumäärä. Sen valintaa altistusmuuttujaksi voidaan perustella esimerkiksi seuraavilla seikoilla:

- Ulkomaanliikenteessä suomalaisiin satamiin vuosittain tulleiden ja niistä lähteneiden alusten lukumäärä, mikä on likimain kaksi kertaa satamakäyntien lukumäärä, löytyy melko helposti merenkulkuhallituksen tilastoista.
- Suurin osa merionnettomuuksista Suomen rannikolla, muun muassa öljyvuototapauksista, on satamien läheisyydessä sattuneita karilleajoja, jolloin alukset nähtävästi ovat olleet matkalla johonkin lähimmistä satamista tai tulossa jostain niistä.
- Tuntuu ilmeiseltä, että tietyllä väylällä liikennöivien alusten lukumäärän kasvaessa myös merionnettomuuksien lukumäärä kasvaa edellyttäen, että olosuhteet ja liikennöivät alukset säilyvät likimain samanlaisina.

Öljyvuotojen lukumäärän riippuvuutta alusten satamakäyntien lukumäärästä voitaisiin testata valitsemalla jokaista vuotoonnettomuudessa mukana ollutta laivaa kohti muutama mahdollisimman samanlainen laiva satunnaisesti ja vertaamalla onnettomuuslaivojen keskimääräistä satamakäyntien lukumäärää vertailulaivojen keskimääräiseen satamakäyntien lukumäärään (Nurminen, 1979). Jos onnettomuuksissa olleiden laivojen satamakäynnit poikkeavat merkitsevästi vertailuryhmän laivojen satamakäynneistä, viittaa se siihen, että satamakäyntien lukumäärän ja öljyvuotojen lukumäärän välillä on riippuvuutta. Yksittäisten alusten satamakäyntien selvittäminen on kuitenkin varsin työlästä, eikä siihen ollut mahdollisuksia tähän työhyn varatun lyhyehkön ajan puitteissa. Sen sijaan saatiin verraten nopeasti kerättyä kansallisuuksittain vuosina 1971 - 1978 ulkomaanliikenteessä (suora ja yhdistetty ulkomainen merenkulku) suomalaisiin merisatamiin lastissa



ja painolastissa saapuneiden ja niistä lähteneiden rahtilai-  
vojen lukumäärä. Tätä lukumäärää kutsutaan jäljempänä  
lyhyyden vuoksi liikennetiheydeksi. Lähteenä on käytetty  
merenkulkuhallituksen vuosittain toimittaman tilaston  
"Merenkulku, meriliikenne Suomen ja ulkomaiden välillä"  
taulukkoa 2. Tästä tilastosta kerätyt tiedot on esitetty  
taulukon 5 palstan "Yhteensä" sarakkeessa I, taulukon 6  
sarakkeissa I ja taulukon 7 sarakkeessa I.

Säiliölaivojen osalta saatiin merenkulkuhallituksesta suoraan  
vastaavat tiedot liikennetiheydestä vuosilta 1977 ja 1978.  
Vuosina 1973 - 1976 oli säiliölaivojen liikennetiheyden las-  
kentaperuste ollut erilainen kuin 1977 ja 1978. Sen vuoksi  
liikennetiheydet vuosilta 1973 - 1976 korjattiin vastaamaan  
rahtilaivojen tilastoa ja säiliölaivojen tilastoa vuosilta  
1977 - 1978. Korjauksessa käytettiin perustana säiliölaivo-  
jen ja rahtilaivojen liikennetiheyksien suhdetta vuosina  
1977 ja 1978 sekä tilastoituja säiliölaivojen ja rahtilaivo-  
jen liikennetiheyksiä vuosina 1973 - 1976. Vuosilta 1972  
ja 1971 ei löydetty minkäänlaista tilastoa säiliölaivojen  
liikennetiheydestä. Taulukossa 5 ko. vuosien kohdalla oleva  
arvio on laskettu myöhempien vuosien liikennetiheyksistä.

Taulukon 5 mukaan on suomalaisiin satamiin tullut ja niistä  
on lähtenyt 1970-luvun alkupuolella ulkomaanliikenteessä  
yhteensä noin 40 000 rahtilaivaa ja loppupuolella noin  
35 000 rahtilaivaa. Samaan aikaan on ulkomaanliikenteessä  
säiliölaivojen liikennetiheys ollut noin 3000 alusta  
vuodessa. Meriliikenne on siis Suomen rannikolla koko  
1970-luvun säilynyt varsin tasaisena.

#### Merionnettomuudet

Taulukkoon 5 on myös merkitty merionnettomuuksien lukumäärä  
vuodessa. Nämä tiedot on kerätty kappaleessa "Lähteet"  
kerrotulla tavalla. Onnettomuuksien lukumäärästä ja lii-  
kennetiheydestä on taulukkoon laskettu onnettomuuksien luku-  
määrä tuhatta satamiin saapunutta ja niistä lähtenyt  
laivaa kohti eli likimain viittä sataa satamakäyntiä kohti.

## TAULUKKO 5

Rahtilaivoille vuosina 1971-1978 Suomen rannikolla sattuneet merionnettomuudet ja suomalaisiin merisatamiin ulkomaanliikenteessä saapuneet ja niistä lähteneet rahtilaivat merenkulkuhallituksen mukaan.

Sarake I = Saapuneet ja lähteneet alukset yhteensä

Sarake II = Onnettomuksien lukumäärä

Sarake III = Onnettomuuksia tuhatta saapunutta ja lähtenyttä alusta kohti

| Vuosi | KUIVALASTILAIVAT |     |       | SÄILIÖLAIVAT |    |       | YHTEENSÄ |     |       |
|-------|------------------|-----|-------|--------------|----|-------|----------|-----|-------|
|       | I                | II  | III   | I            | II | III   | I        | II  | III   |
| 1978  | 32 488           | 19  | 0,585 | 3 158        | 6  | 1,900 | 35 646   | 25  | 0,701 |
| 1977  | 30 163           | 24  | 0,796 | 3 140        | 7  | 2,229 | 33 303   | 31  | 0,931 |
| 1976  | 31 137           | 24  | 0,771 | 3 024        | 7  | 2,315 | 34 161   | 31  | 0,907 |
| 1975  | 32 973           | 24  | 0,728 | 3 001        | 2  | 0,666 | 35 974   | 26  | 0,723 |
| 1974  | 36 630           | 26  | 0,710 | 3 210        | 5  | 1,558 | 39 840   | 31  | 0,778 |
| 1973  | 40 919           | 24  | 0,587 | 3 276        | 7  | 2,137 | 44 195   | 31  | 0,701 |
| 1972  | 40 354           | 33  | 0,818 | 3 259        | 4  | 1,227 | 43 613   | 37  | 0,848 |
| 1971  | 36 658           | 47  | 1,282 | 3 186        | 7  | 2,197 | 39 844   | 54  | 1,355 |
| Yht.  | 281 322          | 221 | 0,786 | 25 254       | 45 | 1,782 | 306 576  | 266 | 0,868 |

## TAULUKKO 6

Suomalaisille ja länsisaksalaisille rahtilaivoille vuosina 1971-1978 Suomen rannikolla sattuneet merionnettomuudet ja suomalaisiin merisatamiin ulkomaanliikenteessä saapuneet ja niistä lähteneet suomalaiset ja länsisaksalaiset rahtilaivat merenkulkuhallituksen mukaan.

Sarake I = Saapuneet ja lähteneet alukset yhteensä

Sarake II = Onnettomuuksien lukumäärä

Sarake III = Onnettomuuksia tuhatta saapunutta ja lähtenyttä alusta kohti

| Vuosi | SUOMALAISET |    |       | LÄNSISAKSALAISET |    |       |
|-------|-------------|----|-------|------------------|----|-------|
|       | I           | II | III   | I                | II | III   |
| 1978  | 17 555      | 15 | 0,854 | 4 671            | 2  | 0,428 |
| 1977  | 16 823      | 18 | 1,070 | 4 353            | 4  | 0,919 |
| 1976  | 17 889      | 19 | 1,062 | 4 150            | 5  | 1,205 |
| 1975  | 20 586      | 13 | 0,631 | 4 203            | 2  | 0,476 |
| 1974  | 22 314      | 15 | 0,672 | 5 002            | 8  | 1,599 |
| 1973  | 24 607      | 21 | 0,853 | 7 126            | 4  | 0,561 |
| 1972  | 23 498      | 21 | 0,894 | 8 089            | 8  | 0,989 |
| 1971  | 20 382      | 31 | 1,521 | 8 269            | 13 | 1,572 |

## TAULUKKO 7

Suomalaisille ja ulkomaisille rahtilaivoille Suomen rannikolla sattuneet merionnettomuudet vuosina 1971-1978 ja suomalaisiin merisatamiin ulkomaanliikenteessä saapuneiden ja niistä lähteneiden rahtilaivojen jakaantuminen kansallisuuksittain merenkulkuhallituksen mukaan.

| Kansallisuus         | I       | II  | III   |
|----------------------|---------|-----|-------|
| Suomalaiset          | 163 654 | 153 | 0,935 |
| <b>Ruotsalaiset</b>  | 32 636  | 6   | 0,184 |
| Norjalaiset          | 5 900   | 9   | 1,525 |
| Tanskalaiset         | 6 085   | 3   | 0,493 |
| Hollantilaiset       | 8 864   | 14  | 1,580 |
| Englantilaiset       | 4 796   | 2   | 0,417 |
| Länsisaksalaiset     | 45 863  | 46  | 1,003 |
| Neuvostoliittolaiset | 21 913  | 11  | 0,502 |
| Puolalaiset          | 5 514   | 8   | 1,451 |
| Muut kansallisuudet  | 11 351  | 14  | 1,233 |



Taulukossa 5 on huomion arvoista rahtilaivojen korkea onnettomuustiheys vuonna 1971. Olettaen että Poisson-prosessi soveltuu Suomen rannikolla tapahtuneiden merionnettomuuksien todennäköisyysteoreettiseen tarkasteluun, on Coxin ja Lewisin (1966) sivulla 232 esittämää testiä käyttäen tutkittu, voisivatko rahtilaivojen onnettomuustiheydet vuosilta 1971 - 1978 olla peräisin samasta Poisson-prosessista. Testisuureen arvoksi saatiin  $d = 14,9$ , mikä poikkeaa tasolla  $P = 4\%$  melkein merkitsevästi siitä, että onnettomuustiheydet olisivat samasta Poisson-prosessista. Kun vuosi 1971 jätettiin pois, saatiin testisuureksi  $d = 4,0$ . Sen mukaan onnettomuustiheydet vuosilta 1972 - 1978 voivat olla samasta Poisson-prosessista. Lopuksi vielä tutkittiin  $(0,1)$ -normaalista testisuuretta käyttäen (Cox&Lewis, 1966, sivu 30) voisiko vuoden 1971 onnettomuustiheys olla peräisin Poisson-prosessista, jonka onnettomuustiheys on sama kuin keskimääräinen onnettomuustiheys vuosina 1972 - 1978. Testisuureen arvoksi saatiin 5,1, mikä osoittaa erittäin merkitsevää poikkeamaa tasolla  $P \approx 10^{-5}\%$ . Vuonna 1971 näyttää tilastojen perusteella kuivalastilaivoille sattuneen poikkeuksellisen paljon onnettomuuksia, kun taas säiliölaivoille on seitsemän onnettomuutta tapahtunut myös kolmena muuna vuonna. Edelleen taulukosta 6 nähdään, että sekä suomalaisille että länsisaksalaisille rahtilaivoille on vuonna 1971 sattunut Suomen rannikolla enemmän onnettomuuksia kuin muina vuosina 1970-luvulla. Tosin länsisaksalaisten rahtilaivojen onnettomuustiheys on vuonna 1974 ollut vielä hieman korkeampi kuin vuonna 1971. Nyt olisi tietenkin mielenkiintoista tietää, mistä suuri tilastoitujen merionnettomuuksien lukumäärä vuonna 1971 saattaisi johtua. Sen tutkimiseen ei kuitenkaan tämän työn puitteissa ollut mahdollisuuksia.

Toinen huomion arvoinen tulos taulukossa 5 on säiliölaivojen korkea onnettomuustiheys verrattuna kuivalastilaivojen onnettomuustiheyteen. Edellä mainittua  $(0,1)$ -normaalista testisuuretta käyttäen saatiin tulokseksi, että säiliölaivojen onnettomuustiheys poikkeaa erittäin merkitsevästi

kuivalastilaivojen onnettomuustiheydestä. Säiliölaivoille näyttäisi siis sattuvan huomattavasti enemmän merionnettomuuksia Suomen rannikolla tuhatta satamiin tullutta ja niistä lähtenyt laivaa kohti kuin kuivalastilaivoille.

Koska säiliölaivoille on tapahtunut vuosittain vain muutama merionnettomuus, poikkeavat eri vuosilta lasketut onnettomuustiheydet melkoisesti toisistaan. Kun tarkasteltava ajanjakso jaetaan vain kahteen osaan, saadaan tulokseksi, että onnettomuustiheys vuosina 1971 - 1974 on ollut 1,779 ja vuosina 1,785. Testaamattakin on selvää, että edellä mainittujen onnettomuustiheyksien välinen ero voi johtua pelkästä sattumasta.

Se että säiliölaivojen onnettomuustiheyksissä 1970-luvun alku- ja loppupuoliskolla ei ole merkittävää eroa ja että kuivalastilaivojen onnettomuustiheydet vuosilta 1972 - 1978 voisivat olla peräisin samasta Poisson-prosessista, ei vielä tietenkään merkitse, että myös öljyvuotoja generoiva prosessi olisi 1970-luvulla säilynyt vakiona. Öljyvuotoja on kuivalastilaivoille sattunut sekä vuosina 1971 - 1974 että vuosina 1975 - 1978 viisi kappaletta, kun mukaan otetaan myös todennäköiset öljyvuototapaukset taulukosta 1. Vuototiheydeksi tuhatta satamiin tullutta ja niistä lähtenyt kuivalastilaivaa kohti saadaan vuosina 1971 - 1974 0,0323 ja vuosina 1975 - 1978 0,0394. Coxin ja Hinkleyn (1974) sivulla 137 esittämän testin perusteella em. vuototiheyksien välinen ero ei ole merkitsevä.

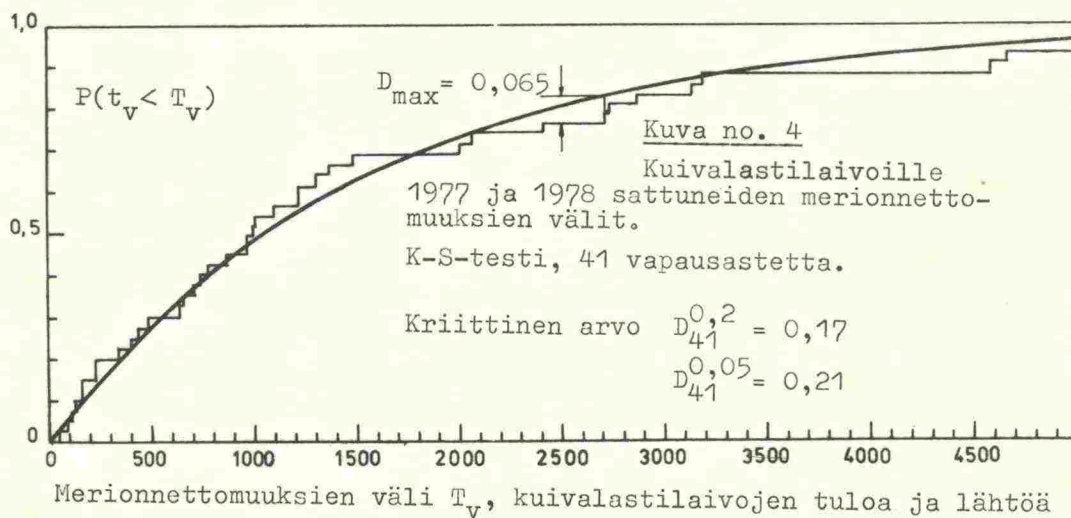
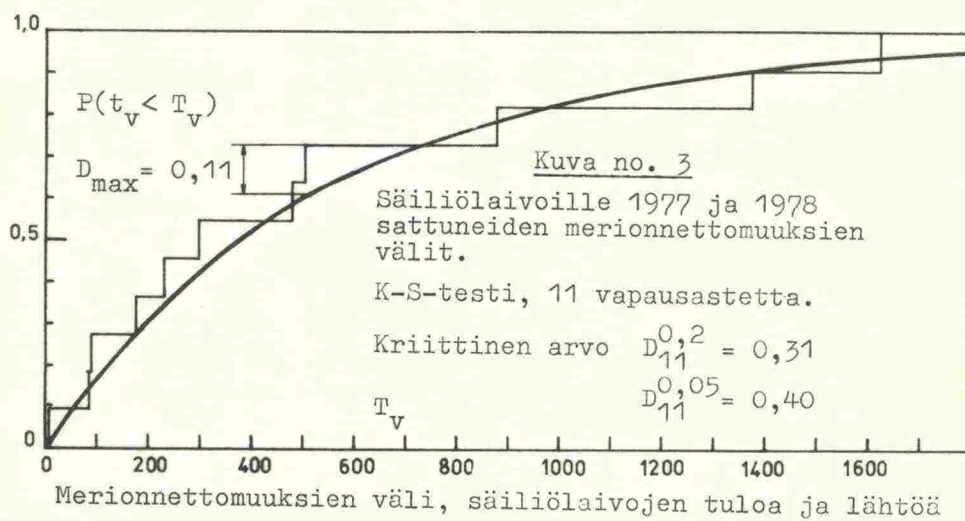
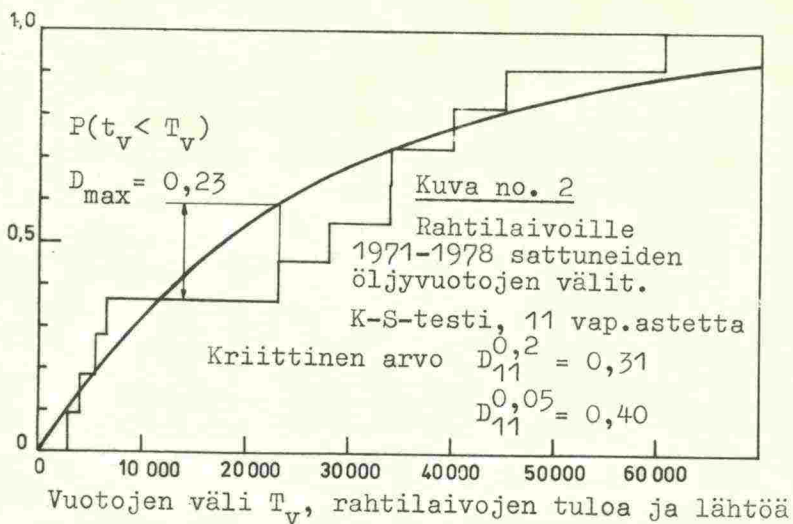
### Poisson-prosessi

Edellä esitetyn perusteella merionnettomuuksia ja öljyvuotoja synnyttävät prosessit näyttäivät säilyneen Suomen rannikolla 1970-luvulla suhteellisen vakaina. Vielä puuttuu näyttö liikennetiheyden sopivuudesta altistusmuuttujaksi ja Poisson-prosessin sopivuudesta merionnettomuuksien ja öljyvuotojen tilastolliseen mallittamiseen.

Regressioanalyysiä käyttäen tutkittiin olisiko vuosittain Suomen rannikolla sattuneiden merionnettomuuksien ja liikennetiheyksien välillä mahdollisesti lineaarista riippuvuutta. Vuosi 1971 jätettiin tarkastelusta pois. Korrelaatiokertoimeksi saatiin  $r = 0,553$ , mikä ei poikkea merkitsevästi nolasta t-testin perusteella. Negatiiviseen tulokseen on mahdollisesti vaikuttanut se, että pisteitä oli käytettävissä vain seitsemän ja liikennetiheys tarkasteltuna ajanjaksona on säilynyt melko vakiona. Kun analyysiin otettiin mukaan piste (0,0), mikä tarkoittaa että onnettomuuksia ei tapahdu kun ei ole liikennettä, saatiin korrelaatiokertoimeksi  $r = 0,957$ .

Poisson-prosessin soveltuvuutta öljyvuototapauksien tarkasteluun käyttäen altistusmuuttujana liikennetiheyttä on tutkittu vertaamalla toisiinsa kaavalla (3) laskettua teoreettista kahden peräkkäisen öljyvuodon välin summafunktiota empiiriseen summafunktioon, joka on määritetty arvioimalla peräkkäisten öljyvuotojen välillä satamiin tulleiden ja niistä lähteneiden rahtilaivojen lukumäärä. Teoreettisen ja empiirisen jakautuman vertailussa on käytetty Kolmogorov-Smirnovin testiä, Ang&Tang (1975), sivu 277. Tulos on esitetty kuvassa 2. Mukaan on otettu taulukosta 1 kaikki kaksitoista kuivalastilaivoille ja säiliölaivoille 1971 - 1978 sattunutta öljyvuoto-onnettomuutta. Kahden peräkkäisen öljyvuodon välillä satamiin saapuneiden ja niistä lähteneiden rahtilaivojen lukumäärä on arvioitu vuosittaisten liikennetiheyksien perusteella olettaen, että liikennetiheyden kuukausittainen jakautuma on ollut sama kuin vuosina 1977 ja 1978. Näiltä vuosilta on ollut käytettävissä merenkulkuhallituksen kuukausitilastot liikennetiheydestä. Kuvasta 2 mittaamalla saadaan suurimmaksi teoreettisen ja empiirisen jakautuman väliseksi eroksi  $D_{11} = 0,23$ . Kolmogorov-Smirnovin testissä eron kriittinen arvo 20 prosentin merkitsevyystasolla on  $D_{11}^{0,2} = 0,31$ . Koska  $D_{11} < D_{11}^{0,2}$ , on kaava (3) sopiva mallittamaan öljyvuotojen väliä.

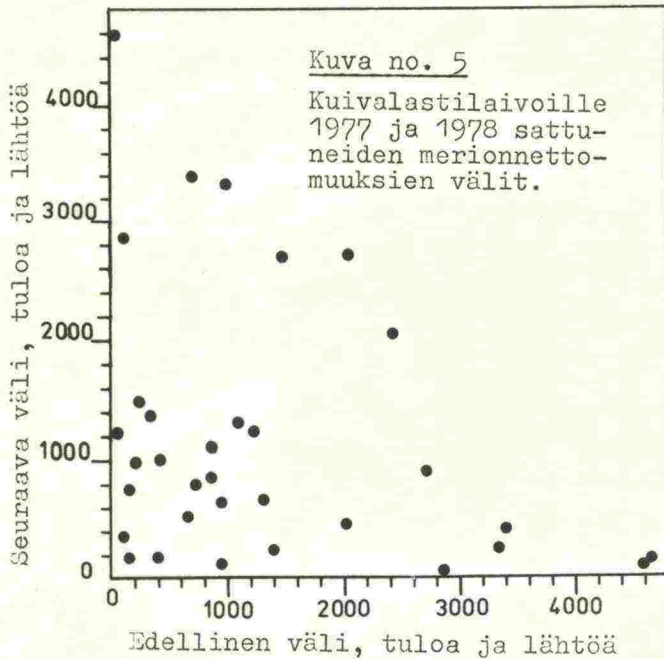




Samalla tavalla kuin kuvassa 2 on verrattu empiiristä öljyvuotojen välin summafunktiota teoreettiseen, on kuvassa 3 verrattu säiliölaivoille vuosina 1977 ja 1978 sattuneiden merionnettomuuksien välin empiiristä summafunktiota teoreettiseen summafunktioon, joka on laskettu kaavalla (3). Teoreettinen ja empiirinen jakautuma ovat varsin lähellä toisiaan. Suurin ero on  $D_{11} = 0,11$  ja kriittinen arvo on sama kuin edellisessä tapauksessa. Hyvä yhtäpitävyys teoreettisen ja empiirisen summafunktion välillä saatiin myös tarkasteltaessa kuivalastilaivoille vuosina 1977 ja 1978 sattuneiden merionnettomuuksien väliä, kuten kuvasta 4 ilmenee.

Kuvassa 5 on tutkittu seuraavan merionnettomuuksien välin riippuvuutta edellisestä välistä. Tarkastelu koskee kuivalastilaivoille vuosina 1977 ja 1978 sattuneita merionnettomuuksia. Kun kyseessä on kolme peräkkäistä merionnettomuutta, aikajärjestyksessä  $i-1$ ,  $i$  ja  $i+1$ , on vaaka-akselilla onnettomuuksien  $i-1$  ja  $i$  välillä satamiin tulleiden ja niistä lähteneiden kuivalastilaivojen lukumäärä ja pystyakselilla ko. lukumäärä onnettomuuksien  $i$  ja  $i+1$  välillä. Kuvan 5 mukainen kuvio, jossa pisteiden hajonta on suuri ja suhteellisen paljon pisteitä on koordinaattiakseleiden lähistöllä, on Coxin ja Lewisin (1966, sivu 12) mukaan tyypillinen Poisson-prosessille. Edellisellä onnettomuudella on tuskin ollut vaikutusta seuraavaan.

Vaikka Poisson-prosessi altistusmuuttujana liikennetiheys näyttää kuvien 2, 3, 4 ja 5 perusteella ainakin jollain tavalla soveltuvan Suomen rannikolla sattuneiden merionnettomuuksien tarkasteluun, ei tästä vielä voida vetää johtopäätöstä, että pelkkä liikennetiheys riittäisi aina selittämään merionnettomuuksien lukumäärän. Onnettomuuksien lukumäärään vaikuttaa varmaankin mm. liikennöivien alusten kunto, miehistöjen koulutustaso ja kokemus, väylien kunto ja sääolot. Kenties jotkut edellä mainituista seikoista ovat vaikuttaneet siihen, että eri kansallisuuksien edustavilla laivoilla onnettomuustiheydet Suomen rannikolla ovat melko eri suuruisia (taulukko 7).



### Öljyvuodot Ruotsin rannikolla

Taulukoihin 8 ja 9 on kerätty vertailun vuoksi joitakin tietoja Ruotsin rannikolla sattuneista öljyvuodoista. Näiden tietojen mukaan, jotka ovat peräisin raportista SOU (1979) kuten kaikki muutkin seuraavassa esitettävät numerotiedot, on Ruotsin rannikolla 1970 - 1978 päässyt säiliölaivojen karilleajoissa ja yhteentörmäyksissä vuosittain mereen keskimäärin noin 500 tonnia öljyä vuodessa, mikä on karkeasti kymmenkertainen määrä verrattuna Suomen rannikolla merionnettomuuksien yhteydessä tapahtuneisiin öljyvuotoihin. Säiliölaivoille on Suomen rannikolla sattunut merenkulkuhallituksen tietojen mukaan 1971 - 1978 vain kaksi öljyvuodon aiheuttanutta merionnettomuutta.

Ruotsin rannikolla on 1970-luvulla tapahtunut säiliölaivoille noin kaksikymmentä öljyvuotoa, joissa mereen on joutunut yli sata tonnia öljyä. Näiden lisäksi on säiliölaivoille sattunut useita kymmeniä pienempiä vuotoja (taulukko 9).



## TAULUKKO 8

Ruotsin itärannikolla, Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolella vuosina 1970-1978 sattuneet merionnettomuudet, joissa öljyä on päässyt mereen suurempia määriä (SOU, 1979).

| Päivämäärä | Alus       | Kartalla<br>n:o | Öljyvuoto   |
|------------|------------|-----------------|-------------|
| 1978       | Okturus    | 20              | 50-75 tn    |
| 18.4.1978  | Oktavius   | 21              | 140 tn      |
| 26.10.1977 | Tsisis     | 22              | väh. 600 tn |
| 13.3.1977  | Tärnsjö    | 23              | 100 tn      |
| 21.8.1976  | Sirocco    | 24              | 300 tn      |
| 24.2.1976  | Sinbadter  | 25              | 200 tn      |
| 3.11.1972  | Aegis Star | 26              | n. 70 tn    |
| 6.10.1979  | Irini      | 27              | n. 1 000 tn |

Kaikki edellä mainitut alukset ovat säiliölaivoja ja kaikki onnettomuudet ovat olleet karilleajoja.

## TAULUKKO 9

Yhteenveto Ruotsin rannikolla vuosina 1970-1978 rannikkovartioston säiliölaivaonnettomuuksien yhteydessä rekisteröimistä öljyvuodoista (SOU, 1979).

| Syy  | Öljyvuotojen<br>lukumäärä | Mereen valu-<br>nut öljymäärä<br>tonneina | Öljyvuodot koon mu-<br>kaan jaoteltuna |         |           |
|--|---------------------------|---|--|---------|-----------|
|  |                           |   | >10 tn                                 | >100 tn | >1 000 tn |
| Karilleajo   | 28                        | 4 200 - 4 400                             | 11                                     | 10      | 3         |
| Yhteentörmäys  | 7                         | 400                                       | 2                                      | 2       |           |
| Venttiilivika,<br>pumppuvika, mur-<br>tunut letku tms. | 42                        | 820 - 870                                 | 7                                      | 3       |           |
| Tuntematon syy   | 49                        | 250 - 500                                 | 3                                      | 1       |           |
| Yhteensä   | 160                       | 6 200 - 6 700                             | 23                                     | 16      | 3         |

Samaan aikaan on Ruotsin öljyntuonti ollut varsin tasaisesti noin 36 miljoonaa tonnia vuodessa eli kolminkertainen verrattuna Suomen öljyntuontiin. Ruotsin öljyntuonnista on noin 45% ollut raakaöljyä. Ruotsin satamissa käy vuosittain yhteensä noin 7000 säiliölaivaa. Viime vuosina on Ruotsin itärannikolla, Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolelle kuljetettu vuosittain noin kahdeksan miljoonaa tonnia öljyä. Määrässä ovat mukana öljyn rannikkokuljetukset. Tätäkin taustaa vasten ovat erot Suomen ja Ruotsin rannikolla säiliölaivoille sattuneiden öljyvuotojen lukumäärissä ja ja mereen valuneissa öljymäärissä todella suuria.

Suomen rannikolla suurin osa merellä sattuneista öljyvuoto-onnettomuuksista on kohdannut kuivalastilaivoja. Ruotsin rannikolla taas kuivalastilaivoille on sattunut verraten vähän öljyvuotoja säiliölaivoihin verrattuna ja mereen joutunut öljymäärä on yleensä ollut pieni. Suhteessa karilleajoihin ja pohjakosketuksiin on kummankin maan rannikolla tapahtunut öljyvuotoja kuivalastilaivoille likimain yhtä paljon eli noin viisi vuotoa sataa karilleajoa ja pohjakosketusta kohti.

## TULOKSET

### Onnettomuuksien lukumäärä

Koska mahdollisesti, jopa todennäköisesti, osa vuosina 1971 - 1978 merionnettomuuksien yhteydessä Suomen rannikolla tapahtuneista öljyvuodoista on jäänyt pois taulukosta 1, on öljyvuotojen todennäköisyyksiä laskettu muutellen lähtöarvona olevaa, vuosina 1971 - 1978 sattuneiden öljyvuotojen lukumäärää. Näin samalla nähdään, mikä vaikutus todennäköisyyksiin on aikaisemmin sattuneiden vuotojen lukumäärällä ja saadaan jonkinlainen arvio siitä, kuinka suuri tilastojen epätarkkuudesta johtuva virhe voi olla.

Kaavalla ( 2 ) on laskettu eri öljyvuotojen lukumäärien todennäköisyyksiä olettaen, että vuosina 1971 - 1978 on sattunut 5, 10, 15 ja 20 öljyvuotoa. Lisäksi on laskettu

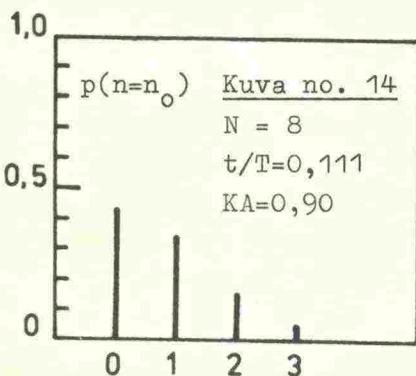
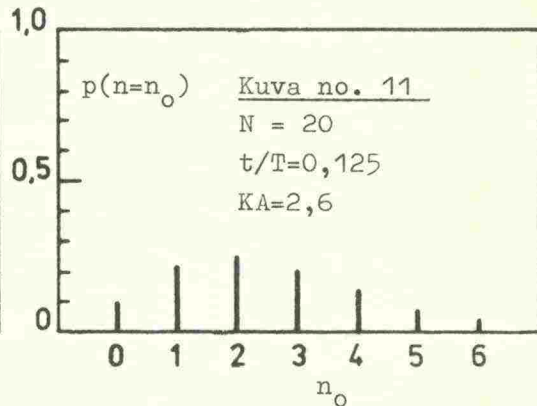
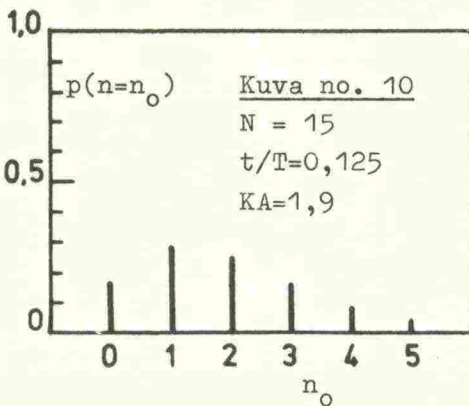
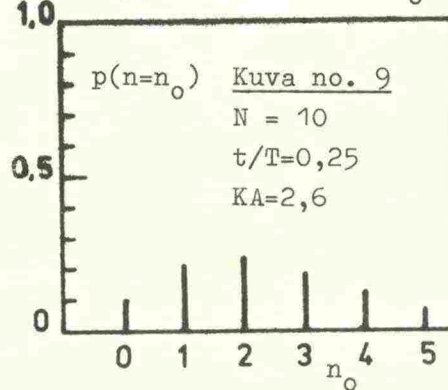
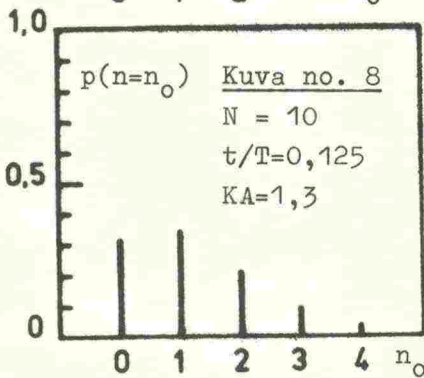
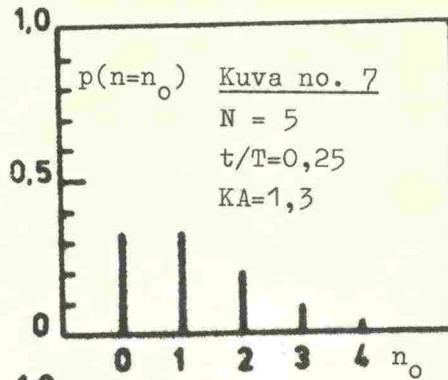
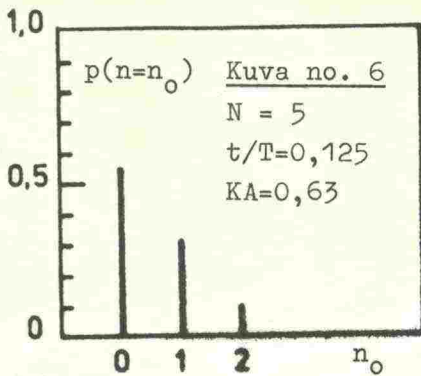
säiliölaivaonnettomuuksien todennäköisyyksiä käyttäen lähtökohtana 45:ttä ja 55:ttä em. aikavälinä sattunutta merionnettomuutta. Liikennetiheyden  $t$  arvona on laskuissa käytetty yhtä kahdeksasosaa tai yhtä neljäsosaa vuosien 1971 - 1978 yhteenlasketusta liikennetiheydestä. Tämä tarkoittaa, että todennäköisyyksiä on laskettu likimain yhden ja kahden vuoden ajanjaksoille edellyttäen, että meriliikenne Suomen satamiin säilyy samanlaisena kuin 1971 - 1978.

Öljyvuotojen lukumäärä  $N = 5$  vastaa likimain muille aluksille kuin rahtilaivoille vuosina 1971 - 1978 merionnettomuuksissa sattuneiden öljyvuotojen lukumäärää. Kuten kuvasta 6 ilmenee, on todennäköisyys, että näitä onnettomuuksia ei satu ainuttakaan yhden vuoden aikana varsin korkea, yli 50%. Yksi öljyvuoto tapahtuu noin 30 prosentin todennäköisyydellä. Kahden vuoden pituisena ajanjaksona on sekä nollan että yhden öljyvuodon todennäköisyys 32%.

Kuivalastilaivoille on 1971 - 1978 sattunut taulukon 1 mukaan ainakin kymmenen öljyvuotoa merionnettomuuksissa Suomen rannikolla. Sijoitettaessa kaavaan (2)  $N = 10$  ja  $t/T = 0,125$  saadaan tulokseksi, että kuivalastilaivoille ei satu ainuttakaan öljyvuotoa yhden vuoden aikana noin 30 prosentin todennäköisyydellä ja sattuu yksi öljyvuoto 34 prosentin todennäköisyydellä. Kolmen vuoden todennäköisyys on vielä hieman alle 10 prosenttia. Keskiarvo on 1,25 öljyvuotoa vuodossa. Tarkasteltavan ajanjakson pidentyessä todennäköisyysmassan painopiste siirtyy oikealle ja hajonta kasvaa. Kahden vuoden aikana sattuu kuivalastilaivoille keskimäärin 2,6 öljyvuotoa, jos 1971 - 1978 on tapahtunut kymmenen vuotoa.

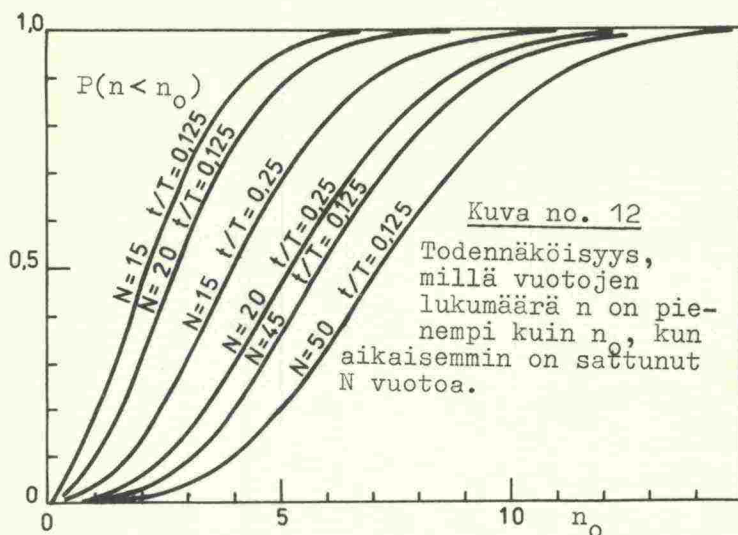
Sama vaikutus tulokseen kuin tarkastelujakson pidentymisellä on aikaisemmin tapahtuneiden öljyvuotojen lukumäärän kasvulla. Kun asetetaan  $N = 20$  ja  $t/T = 0,125$  saadaan käytännöllisesti katsoen sama tulos kuin edellä tarkastelussa tapauksessa, jossa  $N = 10$  ja  $t/T = 0,25$ , kuten kuvia 9 ja 11 vertaamalla voidaan todeta.





Kuvat no. 6 - 11 ja 14.

Todennäköisyys, millä sattuu  $n_0$  onnettomuutta, kun aikaisemmin on sattunut  $N$  onnettomuutta.  $t/T = 0,125$  vastaa likimain 38 000 rahtilaivan tuloa ja lähtöä suomalaisista satamista eli noin yhden vuoden pituista ajanjaksoa.  $KA$  = keskiarvo.



Kuva no. 12.  $t/T = 0,125$  vastaa likimain 38 000 rahtilaivan tai 3000 säiliölaivan tuloa ja lähtöä suomalaisista satamista eli noin yhden vuoden pituista ajanjaksoa.

Onnettomuuksien lukumäärän summafunktiot on esitetty eräille muuttujien  $N$  ja  $t/T$  arvoille kuvassa 12. Kuten em. kuvasta ilmenee, sattuu tässä käytetyn Poisson-mallin perusteella Suomen rannikolla yhden vuoden aikana 95 prosentin todennäköisyydellä vähemmän kuin viisi öljyvuotoa, jos kahdeksan vuoden aikana on tapahtunut viisitoista öljyvuotoa, ja vähemmän kuin kuusi öljyvuotoa, jos aikaisempia vuotoja on ollut kaksikymmentä. Kahden vuoden pituisena ajanjaksona sattuu 95 prosentin todennäköisyydellä vähemmän kuin kahdeksan ja kymmenen öljyvuotoa, kun vastaavasti  $N = 15$  ja  $N = 20$ . Tulos on varsin tarkasti sama, jos kahden vuoden asemesta tarkastellaan yhtä vuotta, mutta  $N = 30$  ja  $N = 40$ . Summafunktio, joka on laskettu parametrien arvoilla  $N = 45$  ja  $t/T = 0,125$ , vastaa Suomen rannikolla yhden vuoden aikana säiliölaivoille tapahtuvia merionnettomuuksia. Näitä onnettomuuksia tapahtuu 95 prosentin todennäköisyydellä vähemmän kuin yksitoista, kuten kyseiseltä käyrältä voidaan lukea.

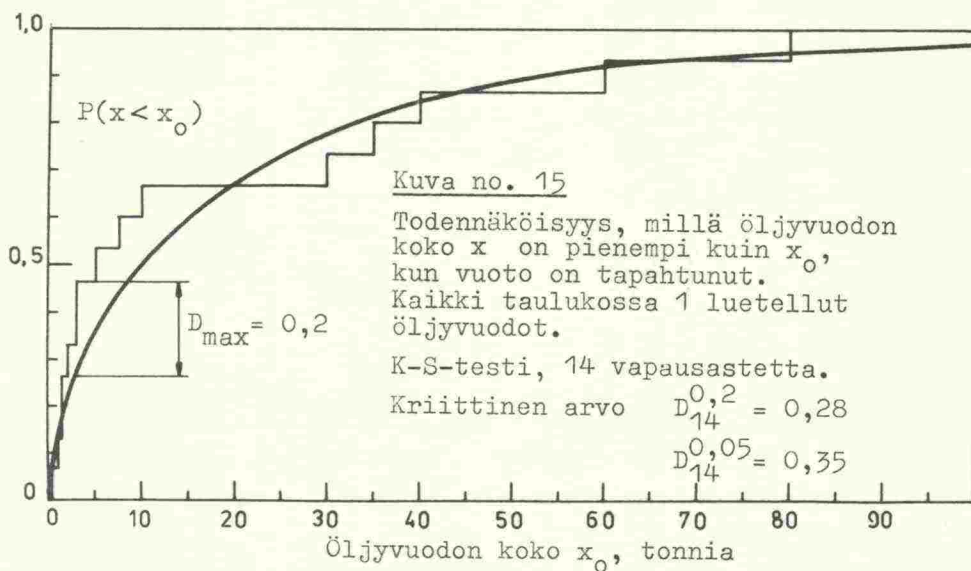
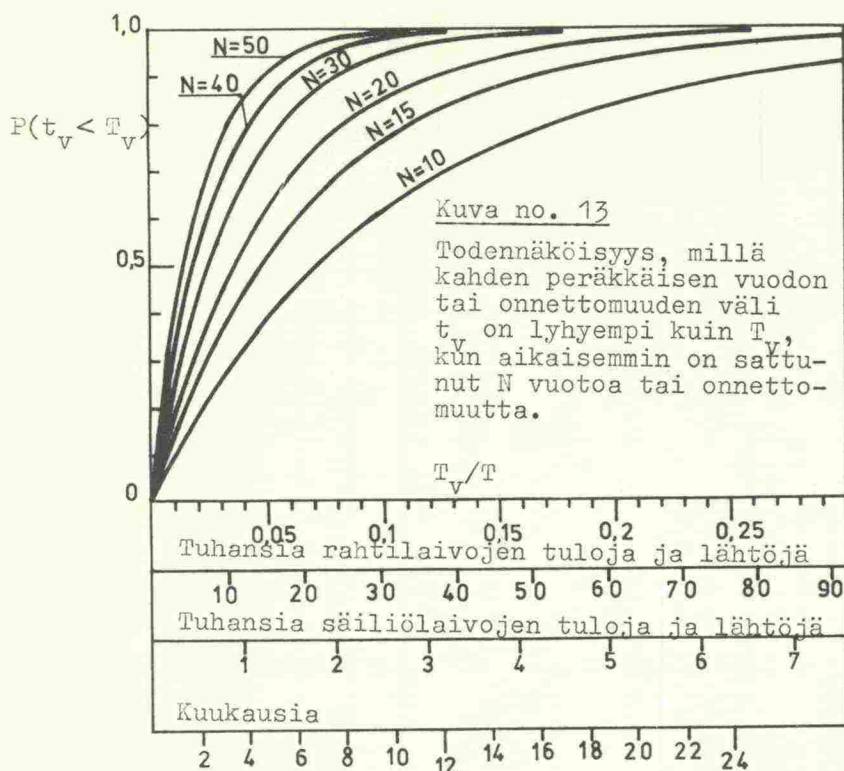
Kahden peräkkäisen säiliölaivaonnettomuuden välinen aika taas on 95 prosentin todennäköisyydellä lyhyempi kuin noin seitsemän kuukautta, jona aikana satamissa ehtii käydä likimain 875 ( $= 1750/2$ ) säiliölaivaa. Tämä ilmenee kuvaan 13 piirretyistä summafunktioista, jotka on laskettu kaavalla (3). Kahden peräkkäisen, merionnettomuudesta johtuvan öljyvuodon väli on 95 prosentin todennäköisyydellä lyhyempi kuin viisitoista ja puoli kuukautta ja 50 prosentin todennäköisyydellä lyhyempi kuin kolme ja puoli kuukautta, jos oletetaan, että vuosina 1971 - 1978 on Suomen rannikolla sattunut 20 öljyvuotoa. Kolme ja puoli kuukautta ja viisitoista ja puoli kuukautta vastaavat 11 000:n ja 49 500:n rahtilaivan tuloa ja lähtöä suomalaisista satamista vuosien 1971 - 1978 keskimääräisen liikennetiheyden perusteella. Jos vuosina 1971 - 1978 oletetaan tapahtuneen viisitoista öljyvuotoa, on vuotojen väli vastaavasti pitempi. Tässä tapauksessa se on 95 prosentin todennäköisyydellä lyhyempi kuin 21 kuukautta.

Vielä lopuksi on laskettu kaavalla (2), millä todennäköisyyksillä Ruotsin itärannikolla Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolella tapahtuu suurempia öljyvuotoja. Lähtökohtana ovat olleet taulukossa 8 luetellut kahdeksan öljyvuotoa. Parametrina  $t/T$  on käytetty yhtä yhdeksäsosaa, mikä vastaa likimain yhtä vuotta, jos liikennetiheys säilyy samanlaisena kuin vuosina 1970 - 1978 keskimäärin. Tulos on esitetty kuvassa 14, josta ilmenee, että yli 40 prosentin todennäköisyydellä näitä öljyvuotoja ei satu ainuttakaan yhden vuoden aikana. Keskiarvo on silti suhteellisen lähellä yhtä öljyvuotoa vuodessa.

### Öljymäärä

Kaavan (4) soveltuvuutta öljyvuodon koon ennustamiseen on tutkittu vertaamalla kaikista taulukossa 1 luetelluista viidestätoista öljyvuodosta muodostettua vuodon koon empiiristä summafunktioita kaavalla (4) laskettuun summafunktioon. Tulos on esitetty kuvassa 15. Teoreettisen ja empiirisen käyrän yhtäpitävyys on kohtalainen. Kolmogorov-Smirnovin





testin mukaan kaava ( 4 ) soveltuu öljyvuodon koon mallittamiseen.

Öljyvuodon koon summafunktioita on laskettu taulukosta 1 muodostettujen vuotoyhdistelmien lisäksi eräille hypoteettisille yhdistelmille. Näin on menetelty sen vuoksi, että taulukosta 1 puuttuu todennäköisesti joitakin pienempiä vuotoja ja lisäksi arviot mereen valuneista öljymääristä ovat ilmeisesti varsin likimääräisiä. Perustapaukseen on otettu mukaan kaikki taulukossa 1 olevat öljyvuodot. Hypotettiset tapaukset on muodostettu lisäämällä perustapaukseen suuria vuotoja, pieniä vuotoja tai kumpiakin. Öljyvuotojen koot, joista seitsemän kuvaan 16 piirrettyä summafunktiota on laskettu, ilmenevät taulukosta 10. Taulukossa 11 on annettu eräitä tilastollisia tunnuslukuja jokaisesta vuotojoukosta. Koska kaavan ( 4 ) parametreinä ovat vain öljyvuotojen lukumäärä, mereen valuneen öljyn kokonaismäärä ja öljymäärien kertoma, saadaan tulokseksi sama summafunktio aina kun kolme em. suuretta säilyvät vakioina riippumatta siitä, millaisia yksittäiset vuodot ovat suuruudeltaan olleet. Sitten taulukossa 10 luetellut öljyvuodot ovat vain yksi mahdollisuus äärettömän monesta, jotka antavat tulokseksi kuvassa 16 esitetyt summafunktiot.

Tarkasteltaessa kuvaan 16 piirrettyjä summafunktioita voidaan todeta niiden kaikkien kasvavan aluksi suhteellisen nopeasti. Yläpäästään ne sen sijaan ovat varsin laakeita. Tämä merkitsee sitä, että jo pieni muutos käyrässä aiheuttaa melko suuren muutoksen öljymäärässä, jota pienempi vuodon koko on suurella, esimerkiksi 95 prosentin todennäköisyydellä. Osaksi tästä johtuu, että vuodon koon ylärajan ennustaminen on epävarmaa.

Perustapauksessa, kuvassa 16 käyrä no. 3, johon on laskettu mukaan kaikki taulukossa 1 luetellut öljyvuodot, on mereen valuva öljymäärä vuodon tapahduttua 95 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 75 tonnia. Kun perustapaukseen lisätään kaksi suurta öljyvuotoa, kooltaan 160 ja 100 tonnia, mikä vastaa esimerkiksi sitä, että aikaisemmin mereen eri

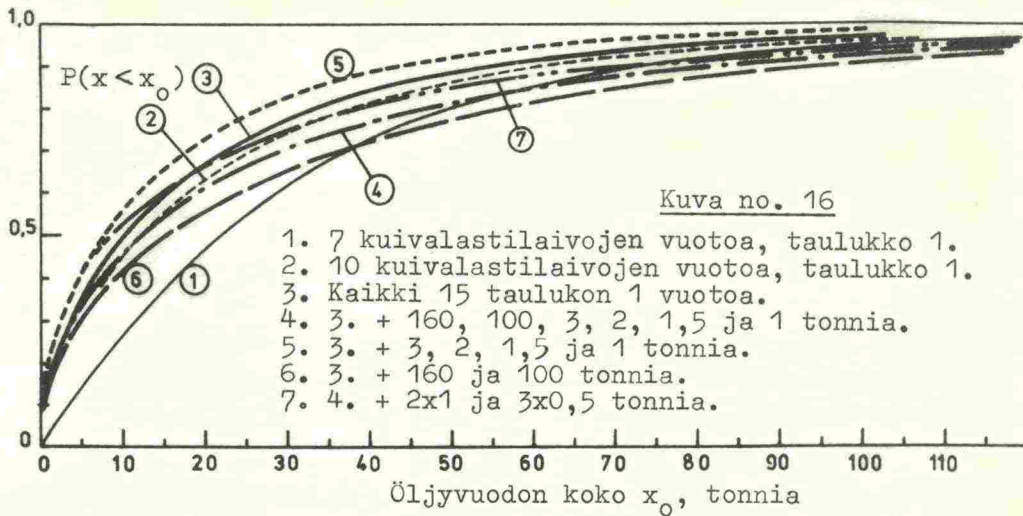
TAULUKKO 10. Kuvaan 16 piirrettyjä summafunktioita vastaavat vuotojoukot.

| Summa-<br>funktio | 160 | 100 | 80 | 60 | 40 | Öljymäärä tonneissa |    |    |     |   |   |   |     |   |     | 1,5 | 1 | 0,5 |
|-------------------|-----|-----|----|----|----|---------------------|----|----|-----|---|---|---|-----|---|-----|-----|---|-----|
|                   |     |     |    |    |    | 35                  | 30 | 10 | 7,5 | 5 | 3 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 |     |   |     |
| 1.                |     |     | 1  |    | 1  | 1                   | 1  | 1  |     | 1 | 1 |   |     |   |     |     |   |     |
| 2.                |     |     | 1  |    | 1  | 1                   | 1  | 1  |     | 1 | 1 | 1 | 1   | 1 |     |     |   |     |
| 3.                |     |     | 1  | 1  | 1  | 1                   | 1  | 1  | 1   | 1 | 2 | 1 | 2   | 1 | 1   |     |   |     |
| 4.                | 1   | 1   |    | 1  | 1  | 1                   | 1  | 1  | 1   | 1 | 3 | 2 | 3   | 2 | 1   |     |   |     |
| 5.                |     |     | 1  | 1  | 1  | 1                   | 1  | 1  | 1   | 1 | 3 | 2 | 3   | 2 | 1   |     |   |     |
| 6.                | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1                   | 1  | 1  | 1   | 1 | 2 | 1 | 2   | 1 | 1   |     |   |     |
| 7.                | 1   | 1   | 1  | 1  | 1  | 1                   | 1  | 1  | 1   | 1 | 3 | 2 | 3   | 3 | 4   |     |   |     |

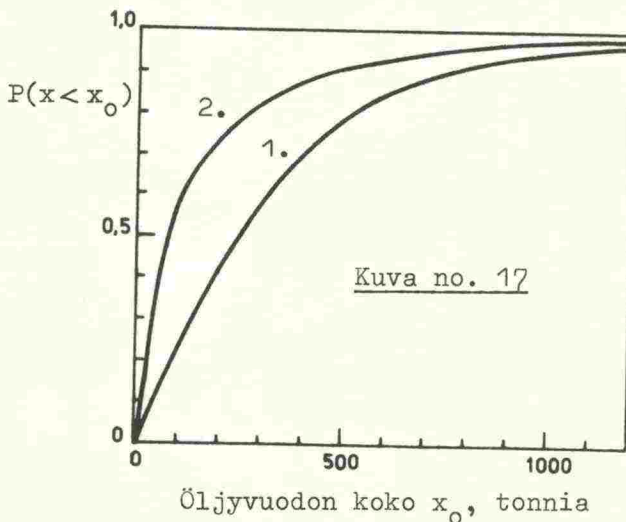
TAULUKKO 11. Taulukossa 10 lueteltujen vuotojoukkojen tilastollisia tunnuslukuja.

|    | M  | AK   | GK   | GK/AK | M = vuotojen lukumäärä | AK = aritmeettinen keskiarvo | GK = geometrinen keskiarvo |
|----|----|------|------|-------|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1. | 7  | 29,0 | 17,5 | 0,603 |                        |                              |                            |
| 2. | 10 | 20,8 | 8,3  | 0,399 |                        |                              |                            |
| 3. | 15 | 18,7 | 6,5  | 0,348 |                        |                              |                            |
| 4. | 21 | 26,1 | 6,7  | 0,257 |                        |                              |                            |
| 5. | 19 | 15,1 | 4,9  | 0,325 |                        |                              |                            |
| 6. | 17 | 31,8 | 9,2  | 0,290 |                        |                              |                            |
| 7. | 26 | 21,2 | 4,7  | 0,223 |                        |                              |                            |





Kuva no. 16. Todennäköisyys, millä öljyvuodon koko  $x$  on pienempi kuin  $x_0$  seitsemässä eri tapauksessa. Tapaukset on valittu Suomen rannikolla merionnettomuuksien yhteydessä 1971 - 1978 sattuneiden öljyvuotojen perusteella.



Kuva no. 17. Todennäköisyys, millä öljyvuodon koko  $x$  on pienempi kuin  $x_0$  vuodon tapahduttua. Tapauksessa 1. ovat mukana kaikki kahdeksan taulukossa 8 lueteltua suurempaa Ruotsin itärannikolla Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolella 1970 - 1978 tapahtunutta öljyvuotoa. Tapauksessa 2. on näihin kahdeksaan vuotoon lisätty kahdeksan pientä vuotoa. Vastaavasti on vuodon koon aritmeettinen keskiarvo pienentynyt 309 tonnista 155 tonniin ja geometrinen keskiarvo 197 tonnista 35 tonniin.

onnettomuuksissa valunut öljymäärä on ollut arvioitua suurempi ja lisäksi on tilastoista jäänyt pois muutama pieni vuoto, siirtyy 95 prosentin raja 140 tonniin (käyrä no. 6). Tässä tapauksessa öljyvuodon koko on 80 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 55 tonnia ja 50 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 15 tonnia. Näitä samoja rajoja vastaavat vuodon koot ovat perustapauksessa 32,5 ja 10 tonnia.

Jos perustapauksen öljyvuotoihin lisätään neljä pientä, muutaman tonnin suuruista vuotoa, saadaan summafunktioksi käyrä no. 5, kuvassa 16 ylin käyrä. Se ei kovinkaan paljoa eroa perustapauksesta. Kaikkein alinna on vuotomäärään 37,5 tonnia saakka kuivalastilaivoille varmasti sattuneista vuodoista laskettu summafunktio, koska ko. vuotojoukossa on vain kaksi pientä vuotoa. Yläpäästään kyseessä oleva käyrä (no. 1) on muiden summafunktioiden keskellä. Kun mukaan otetaan myös todennäköisesti kuivalastilaivoille sattuneet öljyvuodot, siirtyy tarkasteltavan summafunktion alapääkin muiden summafunktioiden joukkoon (käyrä no. 2).

Summafunktio no. 4 on saatu perustapauksesta lisäämällä siihen kaksi edellä mainittua suurta vuotoa ja neljä edellä mainittua pientä vuotoa. Neljällä pienellä vuodolla ei näytä olevan kovin suurta vaikutusta tulokseen, sillä käyrä no. 4 on suhteellisen lähellä käyrää no. 6. Vuotojoukkoon no. 7 sisältyy tapauksen no. 4 vuotojen lisäksi vielä viisi pientä vuotoa. Tulokseksi saadaan summafunktio, jonka mukaan vuodon koko on 95 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 110 tonnia, 80 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 37,5 tonnia ja 50 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 9 tonnia.

Kuvaan 17 piirretyt öljyvuodon koon summafunktiot on laskettu Ruotsin itärannikolla Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolella tapahtuneiden vuotojen perusteella. Käyrässä no. 1 ovat mukana taulukossa 8 luetellut suuremmat vuodot. Käyrä no. 2 on laskettu vuodoista, joissa kahdeksaan suurempaan vuotoon on lisätty kahdeksan pientä vuotoa. Näiden

vaikutuksesta pienien vuotojen todennäköisyydet kasvavat, kun taas suurilla vuotomäärillä käyrät kulkevat melko lähellä toisiaan. Pelkkien suurien vuotojen perusteella on vuotomäärä 95 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin noin tuhat tonnia ja 50 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin 250 tonnia. Käyrältä 2 luettuna vastaavat vuotomäärät ovat 750 ja 70 tonnia.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena on ollut tarkastella öljyvuotojen todennäköisyyksiä Suomen rannikolla ja arvioida odotettavissa oleva öljyvuodon koko, kun vuoto on tapahtunut. Lähtökohtana ovat olleet merenkulkuhallituksen arkistosta kerätyt tiedot vuosina 1971 - 1978 Suomen rannikolla merionnettomuuksissa sattuneista öljyvuodoista. Analyysissä on käytetty Yhdysvalloissa kehitettyä menetelmää, jossa vuotojen lukumäärää tarkastellaan Poisson-prosessina ja vuodon kokoa gamma-prosessina. Teoreettisten ja empiiristen jakautumien vertailun perusteella Poisson-prosessi näyttää soveltuvan Suomen rannikolla sattuneiden merionnettomuuksien ja öljyvuotojen tilastolliseen mallittamiseen. Niin ikään yhtäpitävyys teoreettisen ja empiirisen öljyvuodon koon summafunktion välillä on kohtalainen. Johtopäätökset perustuvat kuitenkin suppeaan aineistoon.

Tiedot 1971 - 1978 Suomen rannikolla tapahtuneista öljyvuodoista ovat epävarmoja. Suuremmat, tonnien suuruusluokaa olevat vuodot ovat ilmeisesti tulleet miltei poikkeuksetta merenkulkuhallituksen tietoon. Sen sijaan pieniä vuotoja on hyvinkin voinut jäädä kirjaamatta. Samoin vuotojen suuruuksia koskevat arviot ovat melko likimääräisiä mm. sen vuoksi, että veteen valuneen öljyn määrää on vaikea arvioida. Lähtötietojen epävarmuus heijastuu johtopäätöksistä.

Kerättyjen tietojen perusteella on kuivalastilaivoille ja säiliölaivoille tapahtunut 1971 - 1978 merionnettomuuksissa



Suomen rannikolla 15 - 20 öljyvuotoa, joissa mereen on valunut vähintään puolesta tonnista yhteen tonniin öljyä. Näiden lisäksi on muille aluksille, kuten autolautoille ja hinaajille, sattunut samana aikavälinä noin viisi öljyvuoto-onnettomuutta. Edellyttäen että meriliikenne Suomen satamiin säilyy likimain samana kuin 1971 - 1978 keskimäärin saadaan Poisson-prosessia soveltaen tulokseksi, että Suomen rannikolla sattuu yhden vuoden aikana rahtilainvoille merionnettomuuksissa 95 prosentin todennäköisyydellä vähemmän kuin viisi tai kuusi öljyvuotoa. Keskimäärin vuotoja sattuu noin kaksi kappaletta vuodessa. Autolautoille ja muille erikoisaluksille sattuu yksi öljyvuoto vuodessa noin kolmenkymmenen prosentin todennäköisyydellä merionnettomuuksissa. Mahdollisuudet ovat kuitenkin hyvät, todennäköisyys 55 prosenttia, että näitä vuotoja ei satu ainuttakaan yhden vuoden aikana.

Kun öljyvuoto tapahtuu Suomen rannikolla merionnettomuuden yhteydessä, on öljyvudon koko käytetyn todennäköisyysteoreettisen mallin perusteella 95 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin noin sata tonnia, 80 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin noin neljäkymmentä tonnia ja 50 prosentin todennäköisyydellä pienempi kuin noin kymmenen tonnia. Näihin tuloksiin on päädytty laskemalla vuodon koon summafunktioita myös vuotojoukoille, joissa varmasti tapahtuneiden vuotojen ohella on ollut mukana sekä suuria että pieniä keksittyjä vuotoja. Ylimääräisten vuotojen suuruudet ja lukumäärä on valittu siten, että ne ovat sopu-soinnussa varmojen vuotojen kanssa. Näin on menetelty, koska tilastosta ilmeisesti puuttuu joitakin pienempiä vuotoja ja arviot vuotomääristä ovat epätarkkoja.

Ruotsin rannikolla merionnettomuuksien yhteydessä tapahtuneet öljyvudot ovat olleet paljon suurempia kuin Suomen rannikolla tapahtuneet. Jos katsotaan, että Ruotsin itärannikolla Gotlannin eteläkärjen pohjoispuolella tapahtuneen suuremman vuodon seurauksena öljyä voi ajautua Suomen rannikolle, sattuu näitä vuotoja noin yksi vuodessa. Vuodon koko voi aikaisemmin Ruotsin rannikolla tapahtuneiden

Öljyvuotojen perusteella olla satoja tonneja. Öljylautan ajelehtiminen Ruotsin rannikolta Suomen rannikolle vaatii kuitenkin ajelehtimisen kannalta edulliset olosuhteet, joten tuskin voidaan olettaa, että öljyä ajautuu Suomen rannikolle jokaisesta suuremmasta öljyvuodosta Ruotsin rannikolla. Öljyä voi ajautua Suomen rannikolle tietenkin myös Neuvostoliiton Itämeren rannikolla tapahtuneen öljyvuodon seurauksena, kuten käytännössäkin on voitu todeta. Käytettävissä ei kuitenkaan ole ollut mitään tilastotietoja Neuvostoliiton rannikolla sattuneista öljyvuodoista.

Todennäköisyyksiä, millä öljyä ajautuu muualta Suomen rannikolle ja sitä, kuinka suuria määriä öljyä on odotettavissa, voitaisiin mahdollisesti tutkia tässä työssä käytetyillä menetelmillä, jos käytettävissä olisi tietoja aikaisemmin sattuneista vastaavanlaisista tapauksista. Tässä työssä käytetyt menetelmät soveltuvat myös satamissa tapahtuvien tahattomien öljyvuotojen todennäköisyysteoreettiseen tarkasteluun. Näitä vuotoja näyttää sattuvan siksi usein, että muutamassa vuodessa kertynee riittävästi aineistoa tilastolliseen analyysiin.

## LÄHDEVIITTAUKSET

- Ang, A H-S & Tang, W H: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol I - Basic Principles. John Wiley & Sons, Inc., New York 1975.
- Cox, D R & Hinkley, D V: Theoretical Statistics. Chapman and Hall, London 1974.
- Cox, D R & Lewis, P A W: The Statistical Analysis of Series of Events. Methuen & Co Ltd, London 1966.
- Devanney, J W & Stewart, R J: Bayesian Analysis of Oil Spill Statistics. Marine Technology, Vol. 11, No. 4, October 1974.
- Donovan, L J & Owen III, J J: A Method to estimate the Pollution Risk and Cost of OCS Oil Transportation. Journal of Petroleum Technology, June 1977.
- IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization): Tanker Casualties Report. Analysis of Serious Casualties to Ocean-Going Tankers 1968 - 1977. London 1978.
- Karppinen, T: Öljyä mereen. Navigator no. 10, lokakuu 1977.
- Kostilainen, V: Analysis of Casualties to Tankers in the Baltic, Gulf of Finland and Gulf of Bothnia in 1960 - 1969. Helsinki University of Technology, Ship Hydrodynamics Laboratory, Report No. 5, 1971.
- Kostilainen, V & Hyvärinen, M: Analysis of Ship Casualties in the Baltic, Gulf of Finland and Gulf of Bothnia in 1971 - 1972. Helsinki University of Technology, Ship Hydrodynamics Laboratory, Report No. 7, 1973.
- Kostilainen, V & Hyvärinen, M: Ship Casualties in the Baltic, Gulf of Finland and Gulf of Bothnia in 1971 - 1975. Helsinki University of Technology, Ship Hydrodynamics Laboratory, Report No. 10, 1976.
- Nurminen, M: Kesäkuussa 1979 käyty yksityinen keskustelu.
- SOU (Statens Officiella Utredningar 1979:44): Ren tur. Program för miljösäkra Sjötransporter. Bilagor 1 - 8. Stockholm 1979.
- Stewart, R J: Tankers in U.S. Waters. Oceanus, Vol. 20, No. 4, Fall, 1977.
- Stewart, R J & Devanney, J W: Estimating Tanker Spill Risks in U.S. Waters. Proceedings of the American Statistical Association, Business & Economics Section, 1978.
- Stewart, J R & Kennedy, M B: An Analysis of U.S. Tanker and Offshore Petroleum Production Oil Spillage through 1975. Final Report to Dr. Robert K. Davis U.S. Department of the Interior, Washington, DC. Contract No. 14 - 01 - 0001 - 2193. 10 May 1978.
- Vermeer, H: A Method of Estimating the Probable Outflow from a Tanker Following Collision Damage. The Royal Institution of Naval Architects, a Paper Issued for Written Discussion, W7, 1978.



## LIITE

Normalisointivakion ja summafunktion (4) numeerisessa laskennassa käytetty menetelmä

Vertaamalla summafunktion (4) sisempää integraalia, jossa integroimismuuttujana on  $r$ , normalisointivakion lausekkeeseen nähdään, että kumpikin on samaa muotoa ja voidaan siten laskea samalla algoritmilla. Käyttäen hyväksi gamma-funktion asymptoottista approksimaatiota suurille muuttujan arvoille voidaan todeta integraalin  $r:n$  suhteen suppenevan, kun vuotomäärien geometrisen ja aritmeettisen keskiarvon suhde on pienempi kuin yksi ja hajaantuvan kun em. suhde on yksi. On kuitenkin helppo todistaa, että geometrinen keskiarvo on aritmeettista keskiarvoa pienempi aina kun lukuja on enemmän kuin yksi ja ainakin yksi luvuista on erisuuri kuin muut. Käytännössä suppeneminen ei ole aiheuttanut ongelmia, sillä vuodot ovat erisuuria ja em. suhde on melko pieni, mikä nopeuttaa suppenemista.

Laskettaessa integraalia  $r:n$  suhteen on integroimisväli jaettu neljään osaan:  $0...1$ ,  $1...10$ ,  $10...30$  ja  $30...∞$ . Kolme ensimmäistä integraalia on laskettu numeerisesti Simpsonin toisella säännöllä käyttäen kullekin välille sopivaa jakoa. Gamma-funktiot integroitavassa funktiossa on laskettu käsikirjan Abramowitz & Stegun (1972)<sup>1</sup> sivulla 256 olevalla kaavalla (6.1.34), kun gamma-funktion muuttuja on välillä  $0...1$  ja kaavoilla (6.1.16) ja (6.1.35), kun muuttuja on suurempi kuin yksi ja pienempi kuin viisikymmentä. Tämän jälkeen on käytetty gamma-funktion asymptoottista esitysmuotoa, kaavaa (6.1.41) edellä mainitussa käsikirjassa. Integraalin neljäs väli eli jäännöstermi on arvioitu approksimoimalla gamma-funktiota Stirlingin kaavalla

$$F(z) \sim \sqrt{2\pi} e^{-z} z^{z-1/2}, \quad (A1)$$

joka pätee asymptoottisesti kun  $z \rightarrow \infty$ . Silloin integraali  $r:n$  suhteen voidaan kirjoittaa muotoon

<sup>1</sup> Abramowitz, M & Stegun, I A: Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications, Inc., New York 1972.

$$I_r = \frac{\Gamma\left[\frac{1}{2}(N+2), -(N+1)r_0 \ln a'\right]}{(2\pi)^{N/2} \sqrt{N+1} \left[-(N+1) \ln a'\right]^{(N+2)/2}}, \quad (A2)$$

jossa  $r_0$  on jäännösintegraalin alaraja eli  $r_0 = 30$  tässä tapauksessa. Vastaava normalisointivakion lauseke saadaan edellisestä, kun  $N$ :lle sijoitetaan arvo  $N-1$  ja  $a'$  korvataan  $a$ :lla. Epätäydellinen gamma-funktio  $\Gamma(. , .)$  kaavassa (A2) on laskettu asympotoottisena sarjakehitelmänä kaavalla (6.5.32) edellä mainitussa käsikirjassa sivulla 263. Tässä työssä annettuja summafunktioita laskettaessa jäännös-termi ja väliä  $r = 10 \dots 30$  vastaava termi integraalissa  $r:n$  suhteen olivat aina hyvin pieniä verrattuna kahteen ensimmäiseen termiin.

Ulompi integraali lausekkeessa (4) on singulaarinen, kun  $x = 0$ , mutta suppeneva. Integrointi  $x:n$  suhteen laskettiin kahdessa osassa käyttäen aloituspisteinä arvoa  $x = AK/50$ , jossa  $AK$  on vuotomäärien aritmeettinen keskiarvo. Tästä pisteestä integroitiin Simpsonin toisella säännöllä ylärajaan  $x_0$  saakka ja kohti nollaa jakamalla integroitava väli aina kymmenenteen osaan edellisestä kunnes lisäys tulokseen oli riittävän pieni. Integraali kohti nollaa suppeni varsin nopeasti.

